# PENGARUH KONFIGURASI FONDASI RAKIT BAMBU TERHADAP PENINGKATAN DAYA DUKUNG TANAH LEMPUNG BERDASARKAN PENGUJIAN LABORATORIUM

Daniel Tjandra[1], Owen Kinanda Sutantyo [2], Gogot Setyo Budi[3], Paravita Sri Wulandari[4*]
[1,3,4] Dosen Teknik Sipil Universitas Kristen Petra
[2] Alumni Teknik Sipil Universitas Kristen Petra

[1] danieltj@petra.ac.id, [2]owensedu19@gmail.com, [3]gogot@petra.ac.id, [4*]paravita@petra.ac.id

**ABSTRAK:** Tanah lempung memiliki daya dukung rendah sehingga memerlukan perbaikan untuk mendukung konstruksi di atasnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh fondasi rakit dan cerucuk terhadap peningkatan daya dukung tanah lempung dengan konsistensi yang berbeda. Pengujian laboratorium dilakukan menggunakan variasi konsistensi tanah (*medium*, *soft*, dan *very soft*), jarak *grid* fondasi sebesar 3D, 4D, dan 5D, jumlah lapisan fondasi 1–3 lapis, serta penggunaan cerucuk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan daya dukung paling efektif diperoleh melalui penambahan jumlah lapisan fondasi. Efektivitas fondasi rakit juga dipengaruhi oleh konsistensi tanah, di mana semakin rendah nilai kuat geser tak terdrainase ($c_u$), semakin besar peningkatan daya dukung yang diperoleh. Kondisi optimum dicapai pada tanah *very soft* dengan konfigurasi jarak *grid* 3D, tiga lapis fondasi, dan penggunaan cerucuk yang meningkatkan daya dukung hingga 65,3%. Hasil ini dapat berkontribusi dalam perancangan fondasi pada tanah lempung lunak.

Kata kunci: fondasi rakit, cerucuk, daya dukung, tanah lempung, pengujian laboratorium.

**ABSTRACT:** *Clay soils generally exhibit low bearing capacity, requiring ground improvement to adequately support structural loads. This study aims to investigate the effects of bamboo raft foundations and bamboo piles (cerucuk) on the bearing capacity of clay soils with different consistency levels. Laboratory tests were conducted using three soil consistency categories (medium, soft, and very soft), foundation grid spacings of 3D, 4D, and 5D, one to three foundation layers, and the presence or absence of bamboo piles. The results indicate that increasing the number of foundation layers is the most effective method for improving bearing capacity. The effectiveness of the raft foundation is also influenced by soil consistency, with lower undrained shear strength* ($c_u$) *resulting in greater bearing capacity improvement. The optimum performance was achieved in very soft clay using a 3D grid spacing, three foundation layers, and bamboo piles, resulting in a bearing capacity increase of 65.3%. These findings provide useful guidance for the design of foundations on soft clay soils.*

Keywords: *raft foundation, bamboo piles, bearing capacity, clay soil, laboratory experiment.*

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki kondisi geologi dan karakteristik tanah yang sangat beragam akibat proses pembentukan geologi yang kompleks. Variasi kondisi tanah tersebut menjadi salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi, khususnya pada daerah yang memiliki tanah dengan karakteristik

geoteknik kurang baik. Salah satu jenis tanah yang banyak dijumpai di berbagai wilayah Indonesia adalah tanah lempung, yang memiliki ukuran butiran sangat halus dengan diameter kurang dari 0,002 mm (Das & Sobhan, 2018). Keberadaan mineral lempung seperti *montmorillonite, illite*, dan *kaolinite* menyebabkan tanah ini memiliki sifat plastisitas yang tinggi serta sensitif terhadap perubahan kadar air (Mitchell & Soga, 2005).

Tanah lempung umumnya memiliki beda nilai *liquid limit* dan *plastic limit* yang tinggi, sehingga menunjukkan karakteristik deformasi yang besar serta kemampuan mengembang-menyusut (*swelling and shrinkage*) akibat perubahan kadar air (Nelson & Miller, 1992). *Liquid limit* adalah kadar air saat tanah beralih dari plastis ke cair, sedangkan *plastic limit* adalah saat tanah mulai retak saat digulung. Selain itu, tanah lempung memiliki permeabilitas yang sangat rendah sehingga proses disipasi tekanan air pori berlangsung lambat. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan tekanan air pori ketika menerima beban eksternal dan berpotensi menurunkan kuat geser tanah, terutama pada kondisi jenuh (Terzaghi et al., 1996). Apabila tegangan akibat beban struktur melebihi kapasitas dukung tanah, maka dapat terjadi kegagalan daya dukung (*bearing capacity failure*) maupun penurunan berlebih (*excessive settlement*) yang dapat mengganggu stabilitas bangunan di atasnya.

Berbagai metode perbaikan tanah telah dikembangkan untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah lempung, seperti penggunaan geosintetik, stabilisasi kimia, pemasangan tiang, maupun penggunaan fondasi rakit (*raft foundation*) (Bergado et al., 1996; Han, 2015). Fondasi rakit merupakan salah satu jenis fondasi dangkal yang bekerja dengan mendistribusikan beban struktur secara lebih merata pada area yang luas, sehingga dapat mengurangi tekanan antara fondasi dan tanah dasar. Metode ini sering digunakan pada tanah dengan daya dukung rendah atau pada kondisi ketika penggunaan fondasi dalam kurang ekonomis (Bowles, 1996).

Penggunaan material lokal sebagai elemen perkuatan tanah telah banyak dikaji karena memiliki keunggulan dari sisi ketersediaan, keberlanjutan, dan biaya konstruksi. Salah satu material lokal yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah bambu. Bambu memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kuat tarik yang baik, serta sifat fleksibel yang memungkinkan material ini digunakan sebagai elemen struktural maupun untuk perkuatan tanah (Janssen, 2000). Pemanfaatan bambu sebagai bagian dari sistem fondasi telah lama dikenal dalam konstruksi tradisional masyarakat Indonesia, khususnya pada daerah dengan kondisi tanah lunak seperti daerah rawa dan pesisir.

Fondasi rakit bambu merupakan salah satu metode tradisional yang memanfaatkan susunan bambu sebagai media distribusi beban pada tanah lunak. Meskipun telah digunakan dalam berbagai konstruksi tradisional di Indonesia, kajian ilmiah mengenai mekanisme kerja, efektivitas, serta parameter desain fondasi rakit bambu masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak membahas penggunaan bambu sebagai material konstruksi atau perkuatan tanah secara umum, sedangkan kajian mengenai pengaruh konfigurasi fondasi rakit bambu dengan variasi tingkat konsistensi tanah terhadap peningkatan kapasitas dukung tanah lempung masih belum dilakukan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan fondasi rakit bambu terhadap peningkatan kapasitas dukung tanah lempung dengan mempertimbangkan variasi kondisi tanah dan konfigurasi desain fondasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode perbaikan tanah

berbasis material lokal yang ekonomis dan berkelanjutan, serta menjadi pertimbangan dalam desain konstruksi pada daerah dengan kondisi tanah lempung lunak.

## 2. LANDASAN TEORI

### 2.1. Konsistensi Tanah Lempung

Konsistensi tanah lempung menentukan seberapa lunak atau keras tanah tersebut. Kategori ini dapat dinyatakan melalui nilai *undrained shear strength*, $c_u$. Untuk menentukan nilai $c_u$ dapat dilakukan dengan melakukan pengujian *vane shear test* atau *unconfined compression test*. Semakin tinggi nilai $c_u$, semakin keras konsistensi tanah tersebut dan sebaliknya, nilai $c_u$ yang rendah mengindikasikan tanah tersebut merupakan tanah yang lunak. Kategori tanah lempung dari lempung sangat lunak sampai lempung keras berdasarkan nilai *unconfined shear strength*, $q_u$ dapat dilihat pada Tabel 1 (nilai $c_u$ adalah setengah dari nilai $q_u$).

Tabel 1. Kategori tanah

| Consistency | $q_u$ | |
|---|---|---|
| | kN/m$^2$ | ton/ft$^2$ |
| Very Soft | 0-25 | 0-0.25 |
| Soft | 25-50 | 0.25-0.5 |
| Medium | 50-100 | 0.5-1 |
| Stiff | 100-200 | 1-2 |
| Very Stiff | 200-400 | 2-4 |
| Hard | >400 | >4 |

Sumber: *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th edition (Das, B. M., & Sobhan, K., 2018)

### 2.2. Fondasi Rakit dan Cerucuk

Bambu merupakan salah satu material alami yang banyak digunakan dalam perkuatan fondasi karena memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik. Ukuran bambu yang umum digunakan sebagai fondasi rakit umumnya memiliki diameter 10 cm. Bambu yang digunakan biasanya berasal dari bambu yang berusia sekitar 5–10 tahun agar kekuatan yang diberikan bambu optimal. Pemilihan ukuran bambu merupakan hal yang sangat penting untuk memastikan bahwa fondasi rakit mampu menahan beban yang diterima dan memberikan stabilitas yang memadai. Selain diameter, ketebalan dinding bambu dan kondisi fisik bambu juga harus diperhatikan dalam perencanaan fondasi rakit.

Cerucuk bambu, atau *bamboo piles*, merupakan teknik tradisional yang telah lama digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah. Penelitian Nugroho dan Sibarani (2013) menunjukkan bahwa penggunaan cerucuk dapat meningkatkan kuat geser tanah lunak secara signifikan. Penelitian ini menekankan pentingnya desain dan implementasi cerucuk yang tepat untuk memastikan efektivitasnya.

Penelitian mengenai penggunaan bambu sebagai elemen perkuatan tanah telah menunjukkan hasil yang baik. Hegde dan Sitharam (2015) menunjukkan bahwa penggunaan bambu dalam bentuk *bamboo cell* dan *bamboo grid* mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah lempung melalui mekanisme *interlocking* antara bambu dan tanah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa bambu memiliki potensi sebagai alternatif material perkuatan

dibandingkan material sintetis seperti geosintetik. Ahirwar dan Mandal (2019) melakukan penelitian terhadap perilaku tanah yang diperkuat dengan *bamboo grid* dan menunjukkan adanya peningkatan kapasitas dukung akibat kontribusi kekuatan tarik dan mekanisme *lateral confinement*.

Penggunaan bambu dalam bentuk *bamboo mat* juga telah diteliti sebagai metode peningkatan kapasitas dukung tanah. Penelitian eksperimental oleh Kumar et al. (2019) menunjukkan bahwa pemasangan lapisan *bamboo mat* pada kedalaman optimum mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah secara signifikan dibandingkan tanah tanpa perkuatan. Penelitian lain oleh Akhila et al. (2021) menunjukkan bahwa variasi ukuran *grid* pada *bamboo mat* memberikan pengaruh terhadap kinerja perkuatan tanah akibat perubahan mekanisme interaksi antara bambu dan tanah.

Salah satu bentuk penerapan tersebut adalah fondasi rakit bambu, yaitu sistem fondasi yang menggunakan susunan bambu sebagai media distribusi beban pada tanah dasar. Konsep ini bekerja dengan memperbesar luas bidang kontak antara struktur dan tanah serta meningkatkan kekakuan lapisan tanah bagian atas. Penelitian Susila dan Agrensa (2015) menunjukkan bahwa kombinasi matras dan cerucuk bambu dapat menjadi alternatif metode perbaikan tanah lunak yang efektif dan ekonomis untuk kondisi lapangan tertentu.

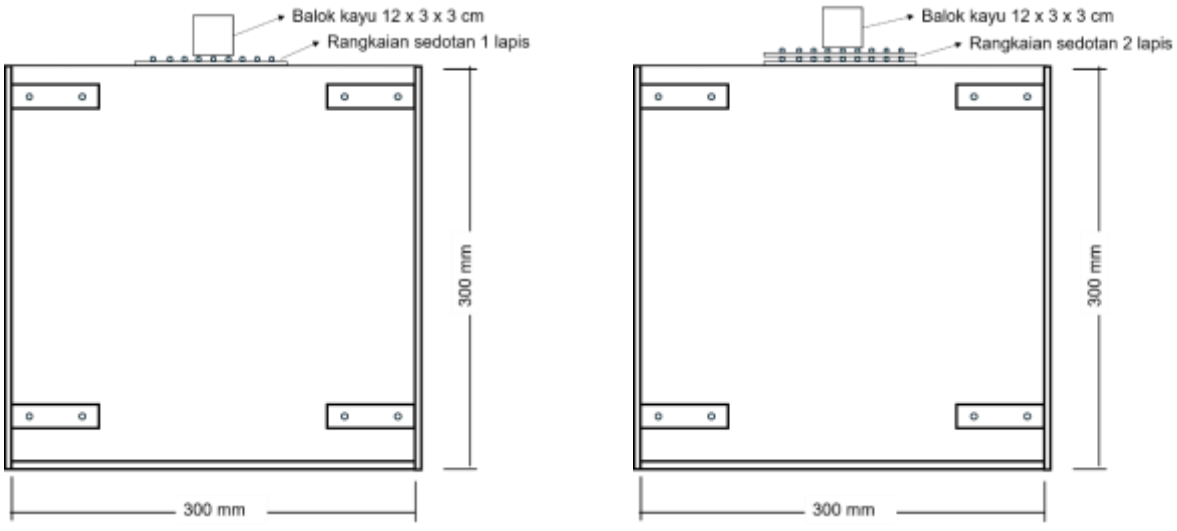
## 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Material Penelitian

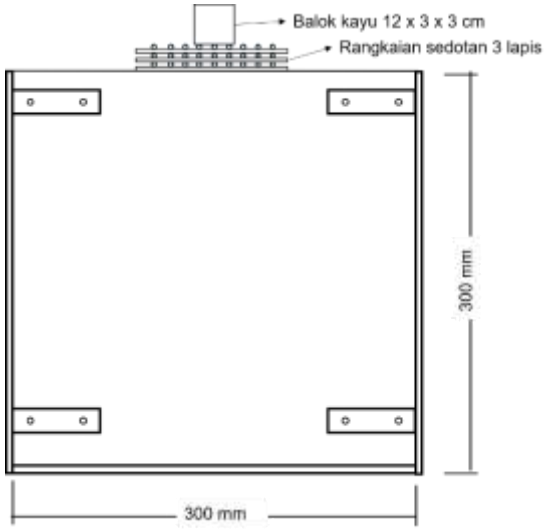
Pada penelitian ini material yang digunakan adalah tanah lempung yang diambil dari daerah perumahan Citraland, Surabaya Barat. Sebagai simulasi penelitian yang dilakukan dengan skala laboratorium, bambu dimodelkan dengan sedotan plastik yang ditutup dengan *sealant*. Sedotan memiliki ukuran panjang 120 mm dan diameter 4 mm.

### 3.2. Detail Penelitian

Rakit bambu dirangkai dengan detail konfigurasi pengujian di laboratorium seperti terlihat pada Gambar 1–3.

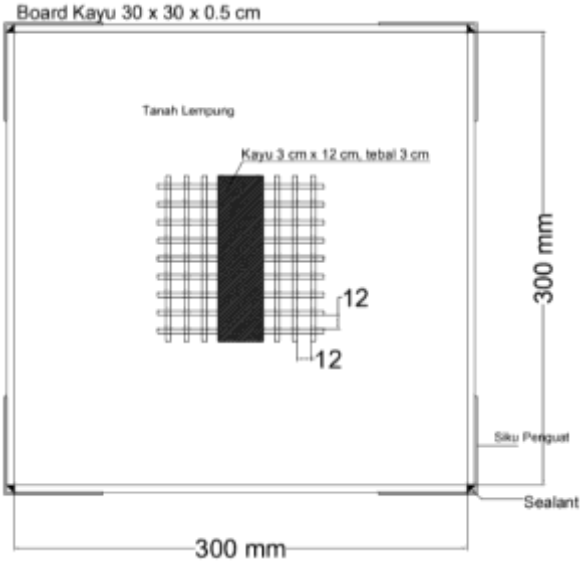



(a) (b)

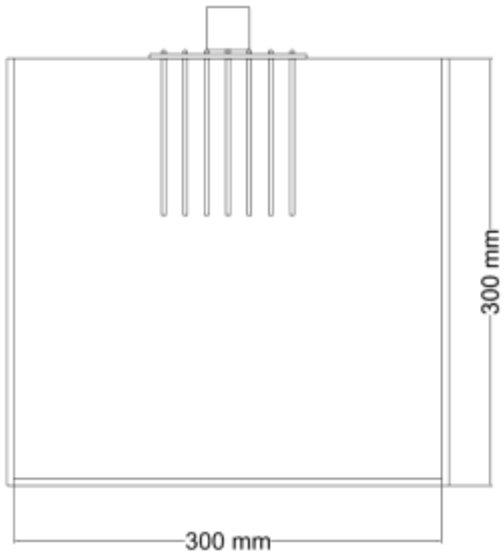



(c)

Gambar 1. Tampak samping detail pengujian daya dukung tanah
(a) 1 lapis; (b) 2 lapis; (c) 3 lapis




Gambar 2. Tampak atas detail pengujian daya dukung tanah




Gambar 3. Tampak potongan samping detail pengujian daya dukung tanah dengan cerucuk

### 3.3. Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan pengetesan batas *Atterberg* untuk memastikan apakah tanah benar merupakan tanah lempung ekspansif. Setelah itu dilakukan pembuatan variasi kadar air tanah. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan tanah dengan kategori *medium, soft,* dan *very soft*. Untuk mendapatkan kategori tersebut, dilakukan pengetesan *vane shear test* dengan kadar air yang sesuai dengan variasi konsistensi tanah (*medium, soft*, dan *very soft*). Setelah itu dilakukan perakitan fondasi rakit dari sedotan. Fondasi rakit tersebut diletakkan di atas tanah pada tempat uji yang berukuran 30 cm x 30 cm x 30 cm (Gambar 1–3) dan kemudian dilanjutkan dengan pengujian daya dukung tanah. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas fondasi rakit dalam meningkatkan stabilitas tanah pada skala laboratorium.

Pengujian ini dilakukan dengan beberapa variabel sebagai berikut:

- Konsistensi tanah = medium, soft, dan very soft
- Jarak *grid* = 3D, 4D, dan 5D
- Jumlah lapisan fondasi rakit = 1 lapis, 2 lapis, dan 3 lapis
- Tanpa cerucuk dan dengan cerucuk

Pengujian laboratorium utama menggunakan mesin penekan untuk mendapatkan kekuatan daya dukung tanah. Pengujian ini dilakukan dengan meletakkan kotak uji yang telah dibuat sebelumnya pada mesin penekan. Pengujian dilakukan dengan menambahkan balok kayu 12 x 3 cm dengan ketebalan 3 cm untuk meratakan beban. Data dari dial dicatat secara berkala hingga titik tertinggi atau saat dial menunjukkan penurunan. Beberapa data lain yang diperlukan adalah:

- Kalibrasi dial = 0,28 kgf/div
- Beban tambahan = 41,7 g (balok kayu)
- Luas permukaan = 36 cm2

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Batas-Batas Atterberg

Hasil pengujian batas Atterberg dan *specific gravity* tanah yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas *Atterberg* dan *specific gravity*

| No. | Pengujian | Hasil |
|---|---|---|
| 1 | *Liquid Limit (LL)* | 81.4% |
| 2 | *Plastic Limit (PL)* | 29.1% |
| 3 | *Specific Gravity* | 2.637 |

### 4.2. Vane Shear Test

Hasil pengujian uji geser baling atau *vane shear test* dapat dilihat pada Tabel 3. Data dari hasil *average* $c_u$ pada Tabel 3 dibandingkan dengan Tabel 1 untuk mendapatkan kategori konsistensi tanah pada setiap kadar air yang berbeda. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kadar air sangat memengaruhi konsistensi tanah lempung.

Tabel 3. Hasil *vane shear test*

| No. | *Water Content* | *Final Reading (Degree)* | *Torque (Kg.cm)* | *Convert to (N.m)* | *Shear Strength (kPa)* | *Average* $c_u$ *(kPa)* | *Category* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | 120 | 0,917 | 0,090 | 27,919 | | |
| 2 | 40% | 111 | 0,871 | 0,085 | 26,535 | 27,150 | *Medium* |
| 3 | | 113 | 0,886 | 0,087 | 26,996 | | |
| 4 | | 98 | 0,750 | 0,074 | 22,843 | | |
| 5 | 50% | 95 | 0,727 | 0,071 | 22,151 | 22,151 | *Soft* |
| 6 | | 92 | 0,705 | 0,069 | 21,459 | | |
| 7 | | 67 | 0,515 | 0,050 | 15,690 | | |
| 8 | 60% | 72 | 0,553 | 0,054 | 16,844 | 16,536 | *Soft* |
| 9 | | 73 | 0,561 | 0,055 | 17,075 | | |
| 10 | | 48 | 0,367 | 0,036 | 11,184 | | |
| 11 | 70% | 44 | 0,336 | 0,033 | 10,232 | 10,628 | *Very Soft* |
| 12 | | 45 | 0,344 | 0,034 | 10,470 | | |

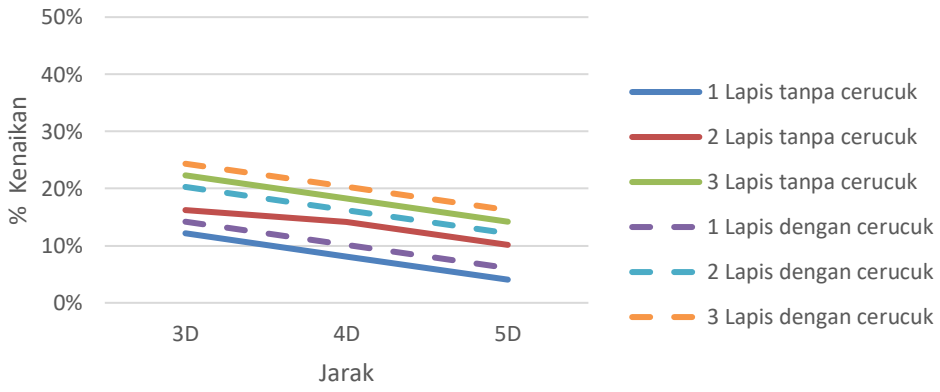
### 4.3. Uji Daya Dukung Tanah dengan Mesin Penekan

#### 4.3.1. *Pengujian 1*: *Medium Clay* (*Water Content* 40%)

Pengujian pertama dilakukan dengan tanah yang memiliki kategori *medium clay*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 4. Jumlah kenaikan daya dukung dihitung dalam persen terhadap kondisi daya dukung tanah tanpa perkuatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jarak dan jumlah lapisan berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah. Fondasi rakit dengan jarak *grid* lebih dekat dan lapisan lebih banyak dapat meningkatkan daya dukung tanah. Peningkatan ini disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu: redistribusi tegangan (*stress redistribution*), peningkatan kekakuan sistem fondasi, dan penyebaran beban (*load distribution*).

Tabel 4. Peningkatan daya dukung pada pengujian 1

| | Max Load (div) | $\sigma_{max}$ (kg/cm$^2$) | Kenaikan (%) |
|---|---|---|---|
| Tanah Saja | 24,5 | 0,192 | - |
| 1 lapis | | | |
| 3D | 27,5 | 0,215 | 12,2% |
| 4D | 26,5 | 0,207 | 8,1% |
| 5D | 25,5 | 0,199 | 4,1% |
| 2 lapis | | | |
| 3D | 28,5 | 0,223 | 16,2% |
| 4D | 28 | 0,219 | 14,2% |
| 5D | 27 | 0,211 | 10,1% |
| 3 lapis | | | |
| 3D | 30 | 0,234 | 22,3% |
| 4D | 29 | 0,227 | 18,3% |
| 5D | 28 | 0,219 | 14,2% |
| 1 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 28 | 0,219 | 14,2% |
| 4D | 27 | 0,211 | 10,1% |
| 5D | 26 | 0,203 | 6,1% |
| 2 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 29,5 | 0,231 | 20,3% |
| 4D | 28,5 | 0,223 | 16,2% |
| 5D | 27,5 | 0,215 | 12,2% |
| 3 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 30,5 | 0,238 | 24,3% |
| 4D | 29,5 | 0,231 | 20,3% |
| 5D | 28,5 | 0,223 | 16,2% |



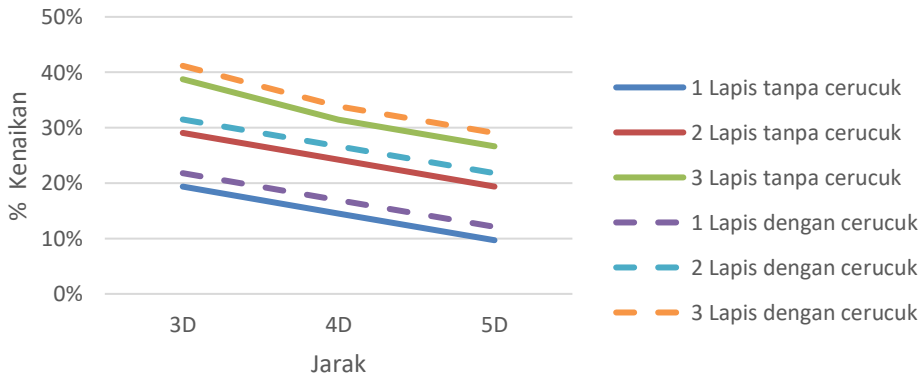

Gambar 4. Pengaruh jarak, jumlah lapis dan cerucuk terhadap kenaikan daya dukung pada pengujian 1

### 4.3.2. *Pengujian 2*: *Soft Clay* (*Water Content* 60%)

Pengujian kedua dilakukan dengan tanah yang memiliki kategori *soft clay*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 5.

Tabel 5. Peningkatan daya dukung pada pengujian 2

| | Max Load (div) | $\sigma_{max}$ (kg/cm$^2$) | Kenaikan (%) |
|---|---|---|---|
| Tanah Saja | 20,5 | 0,161 | - |
| 1 lapis | | | |
| 3D | 24,5 | 0,192 | 19,4% |
| 4D | 23,5 | 0,184 | 14,5% |
| 5D | 22,5 | 0,176 | 9,7% |
| 2 lapis | | | |
| 3D | 26,5 | 0,207 | 29,1% |
| 4D | 25,5 | 0,199 | 24,2% |
| 5D | 24,5 | 0,192 | 19,4% |
| 3 lapis | | | |
| 3D | 28 | 0,219 | 38,7% |
| 4D | 27 | 0,211 | 31,5% |
| 5D | 26 | 0,203 | 26,6% |
| 1 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 25 | 0,196 | 21,8% |
| 4D | 24 | 0,188 | 16,9% |
| 5D | 23 | 0,180 | 12,1% |
| 2 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 27 | 0,211 | 31,5% |
| 4D | 26 | 0,203 | 26,6% |
| 5D | 25 | 0,196 | 21,8% |
| 3 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 28,5 | 0,223 | 41,1% |
| 4D | 27,5 | 0,215 | 33,9% |
| 5D | 26,5 | 0,207 | 29,1% |




Gambar 5. Pengaruh jarak, jumlah lapis dan cerucuk terhadap kenaikan daya dukung pada pengujian 2

Dari Gambar 5 dapat disimpulkan bahwa jarak dan jumlah lapisan lebih berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah dibandingkan tanah lempung katagori medium. Pada

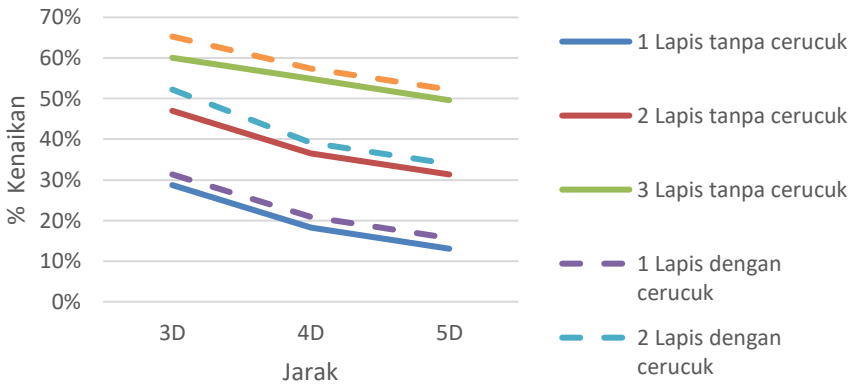
*medium clay*, nilai *undrained shear strength,* $c_u$ relatif lebih tinggi sehingga tanah telah memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menahan beban. Akibatnya, sebagian besar beban dapat dipikul langsung oleh tanah sehingga kontribusi fondasi rakit terhadap peningkatan daya dukung menjadi relatif terbatas. Dengan kata lain, karena kapasitas awal tanah sudah cukup tinggi, maka kemungkinan untuk meningkatkan daya dukung menjadi lebih kecil.

4.3.2. *Pengujian 3*: *Very Soft Clay* (*Water Content* 70%)

Pengujian ketiga dilakukan dengan tanah yang memiliki kategori *very soft clay*. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 6. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas fondasi rakit meningkat seiring dengan menurunnya konsistensi tanah, ditunjukkan oleh persentase kenaikan daya dukung yang lebih besar pada tanah *soft* dan terutama *very soft* dibandingkan *medium clay*. Fenomena ini berkaitan dengan mekanisme distribusi tegangan dan deformasi tanah di bawah pembebanan.

Tabel 6. Peningkatan daya dukung pada pengujian 3

| | Max Load (div) | $\sigma_{max}$ (kg/cm$^2$) | Kenaikan (%) |
|---|---|---|---|
| Tanah Saja | 19 | 0,149 | - |
| 1 lapis | | | |
| 3D | 24,5 | 0,192 | 28,7% |
| 4D | 22,5 | 0,176 | 18,3% |
| 5D | 21,5 | 0,168 | 13,1% |
| 2 lapis | | | |
| 3D | 28 | 0,219 | 47,0% |
| 4D | 26 | 0,203 | 36,6% |
| 5D | 25 | 0,196 | 31,3% |
| 3 lapis | | | |
| 3D | 30,5 | 0,238 | 60,1% |
| 4D | 29,5 | 0,231 | 54,8% |
| 5D | 28,5 | 0,223 | 49,6% |
| 1 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 25 | 0,196 | 31,3% |
| 4D | 23 | 0,180 | 20,9% |
| 5D | 22 | 0,172 | 15,7% |
| 2 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 29 | 0,227 | 52,2% |
| 4D | 26,5 | 0,207 | 39,2% |
| 5D | 25,5 | 0,199 | 33,9% |
| 3 lapis dengan cerucuk | | | |
| 3D | 31,5 | 0,246 | 65,3% |
| 4D | 30 | 0,234 | 57,4% |
| 5D | 29 | 0,227 | 52,2% |




Gambar 6. Pengaruh jarak, jumlah lapis dan cerucuk terhadap kenaikan daya dukung pada pengujian 3

Pada *soft* dan *very soft clay*, tanah memiliki kekakuan dan kuat geser yang rendah sehingga mudah mengalami deformasi ketika menerima pembebanan. Pada kondisi ini, keberadaan fondasi rakit memberikan pengaruh yang lebih signifikan karena mampu menyebarkan beban ke area yang lebih luas, mengurangi konsentrasi tegangan di bawah fondasi, serta meningkatkan kekakuan sistem fondasi dan tanah. Akibatnya, tegangan yang bekerja pada tanah menjadi lebih merata sehingga kapasitas dukung meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Selain itu, tanah lunak mengalami deformasi yang lebih besar dibandingkan tanah berkonsistensi sedang. Semakin besar deformasi yang terjadi, semakin besar pula kontribusi elemen perkuatan dalam membatasi penurunan dan redistribusi tegangan. Oleh karena itu, efektivitas fondasi rakit menjadi semakin tinggi pada tanah dengan konsistensi yang lebih lunak.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa manfaat penggunaan fondasi rakit tidak hanya ditentukan oleh konfigurasi fondasi, tetapi juga oleh karakteristik tanah yang diperkuat. Semakin rendah nilai $c_u$, semakin besar peningkatan daya dukung yang dapat diperoleh melalui penggunaan fondasi rakit.

## 4.4. Diskusi

Dari hasil pengolahan data pengujian daya dukung tanah mulai dari pengujian 1 sampai dengan 3, dilakukan analisis dengan membuat beberapa grafik untuk membandingkan pengaruh perkuatan tanah.

### 4.4.1. *Pengaruh Jumlah Lapisan dan Konsistensi Tanah*

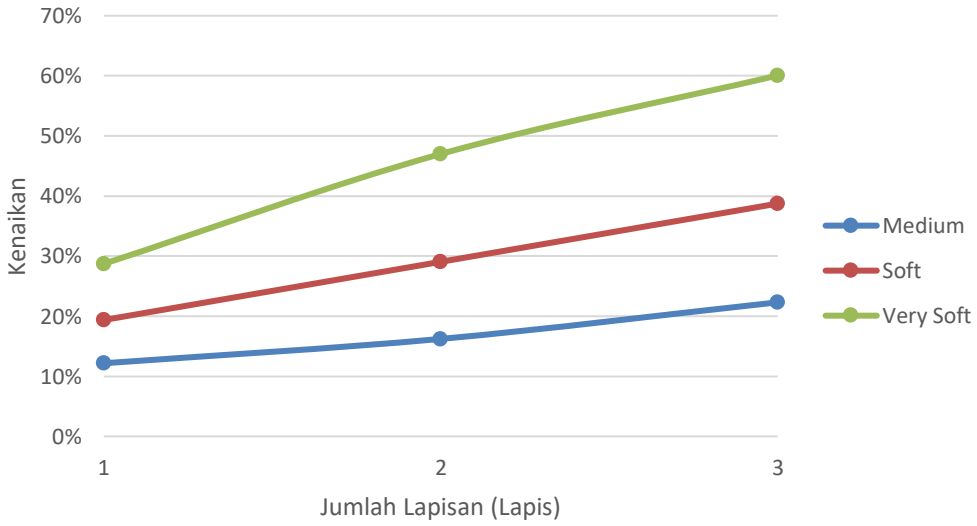
Dari pengujian yang telah dilakukan, dapat dilakukan analisis pengaruh jumlah lapisan terhadap tanah yang memiliki konsistensi berbeda. Hasil dari analisis ini disajikan pada Tabel 7 dan Gambar 7. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah lapisan fondasi rakit merupakan parameter yang paling berpengaruh dalam meningkatkan daya dukung tanah lempung. Pada seluruh variasi konsistensi tanah, penambahan jumlah lapisan secara konsisten menghasilkan peningkatan daya dukung yang lebih besar dibandingkan variasi jarak *grid* maupun penggunaan cerucuk. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi vertikal fondasi rakit memiliki peran dominan dalam memperbaiki respons mekanis sistem fondasi dan tanah.

Secara mekanis, penambahan jumlah lapisan meningkatkan kekakuan sistem fondasi sehingga beban yang bekerja tidak lagi terkonsentrasi pada area kecil di bawah fondasi, tetapi tersebar ke area yang lebih luas. Distribusi tegangan yang lebih merata menyebabkan tegangan maksimum pada tanah berkurang, sehingga kemungkinan terjadinya keruntuhan geser menjadi lebih kecil.

Selain meningkatkan distribusi beban, penambahan lapisan juga memperbesar ketebalan zona perkuatan di bawah fondasi. Zona perkuatan yang lebih tebal memungkinkan beban diteruskan secara bertahap ke lapisan tanah di bawahnya sehingga deformasi lokal dapat dikurangi. Dengan demikian, sistem fondasi tidak hanya meningkatkan kapasitas dukung ultimit, tetapi juga meningkatkan kekakuan keseluruhan sistem fondasi dan tanah.

Tabel 7. Pengaruh jumlah lapisan pada tiap konsistensi tanah

| Jumlah Lapisan | Kenaikan |
|---|---|
| Medium | |
| 1 Lapisan 3D | 12,2% |
| 2 Lapisan 3D | 16,2% |
| 3 lapisan 3D | 22,3% |
| Soft | |
| 1 Lapisan 3D | 19,4% |
| 2 Lapisan 3D | 29,1% |
| 3 lapisan 3D | 38,7% |
| Very Soft | |
| 1 Lapisan 3D | 28,7% |
| 2 Lapisan 3D | 47,0% |
| 3 lapisan 3D | 60,1% |




Gambar 7. Pengaruh jumlah lapisan pada tiap konsistensi tanah

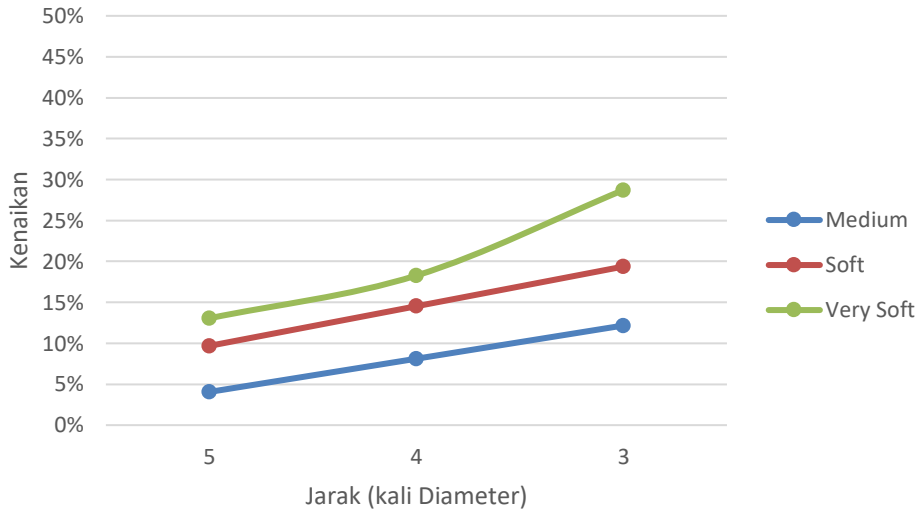
Pada Tabel 7 dan Gambar 7 juga terlihat bahwa ketika $c_u$ rendah, efektivitas perkuatan meningkat. Hal ini menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara $c_u$ dan efektivitas perkuatan. Semakin kecil kuat geser tanah, semakin besar kontribusi fondasi rakit dalam meningkatkan kapasitas dukung. Fenomena tersebut konsisten dengan konsep dasar perbaikan tanah, yaitu bahwa metode perkuatan umumnya memberikan manfaat yang lebih besar pada tanah dengan kapasitas awal yang rendah dibandingkan pada tanah yang telah memiliki kapasitas dukung relatif tinggi.

### 4.4.2. *Perbandingan Pengaruh Jarak Grid dengan Konsistensi Tanah*

Jarak *grid* merupakan salah satu variabel yang diteliti. Pengaruh jarak dapat dilihat dan dibandingkan dengan melihat persen kenaikan yang akan berpengaruh pada setiap konsistensi tanah dengan 1 lapis perkuatan (Tabel 8 dan Gambar 8). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengurangan jarak *grid* dari 5D menjadi 4D dan 3D secara konsisten meningkatkan daya dukung tanah pada seluruh variasi konsistensi tanah. Peningkatan ini menunjukkan bahwa konfigurasi fondasi rakit berperan penting dalam mengendalikan mekanisme distribusi beban ke tanah dasar.

Tabel 8. Pengaruh jarak *grid* pada tiap konsistensi tanah

| Jarak | Kenaikan Daya Dukung | | |
|---|---|---|---|
| | *Medium* | *Soft* | *Very Soft* |
| 5D | 4,1% | 9,7% | 13,1% |
| 4D | 8,1% | 14,5% | 18,3% |
| 3D | 12,2% | 19,4% | 28,7% |




Gambar 8. Pengaruh jarak *grid* fondasi rakit pada tiap konsistensi tanah dengan jumlah lapisan sama

Secara mekanis, jarak *grid* yang lebih rapat menyebabkan elemen penyusun fondasi rakit bekerja secara lebih terpadu dalam menerima dan mendistribusikan beban. Beban yang bekerja pada fondasi tidak lagi diteruskan secara terlokalisasi, tetapi disebarkan ke area yang lebih luas sehingga konsentrasi tegangan di bawah fondasi berkurang. Distribusi tegangan yang lebih merata tersebut meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan beban sebelum mengalami keruntuhan geser.

Selain itu, pengurangan jarak *grid* meningkatkan jumlah elemen fondasi dalam luas area yang sama. Bertambahnya luas area fondasi menyebabkan kekakuan sistem fondasi meningkat sehingga deformasi lokal tanah dapat dikurangi. Dengan deformasi yang lebih kecil, mekanisme keruntuhan tanah berkembang lebih lambat dan kapasitas dukung ultimit menjadi lebih tinggi.

Pengaruh jarak *grid* lebih signifikan pada tanah dengan konsistensi yang lebih lunak. Pada tanah very soft, penurunan kuat geser menyebabkan tanah lebih mudah mengalami deformasi sehingga distribusi tegangan yang lebih merata akibat jarak *grid* yang rapat memberikan

manfaat yang lebih besar dibandingkan pada medium clay. Hal ini terlihat dari peningkatan daya dukung yang jauh lebih besar pada konfigurasi 3D dibandingkan 5D. Namun demikian, dibandingkan dengan jumlah lapisan fondasi, pengaruh jarak *grid* masih relatif lebih kecil.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penggunaan fondasi rakit terbukti mampu meningkatkan daya dukung tanah lempung pada seluruh variasi konsistensi tanah yang diteliti. Besarnya peningkatan dipengaruhi oleh konfigurasi fondasi, khususnya jumlah lapisan dan jarak *grid*.
2. Penambahan jumlah lapisan fondasi rakit merupakan parameter yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap peningkatan daya dukung tanah. Semakin banyak lapisan yang digunakan, semakin besar kemampuan fondasi dalam mendistribusikan beban sehingga kapasitas dukung tanah meningkat.
3. Jarak *grid* yang lebih rapat menghasilkan peningkatan daya dukung yang lebih tinggi dibandingkan jarak *grid* yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi fondasi yang lebih rapat mampu mendistribusikan beban secara lebih efektif ke tanah di bawahnya.
4. Efektivitas fondasi rakit meningkat seiring menurunnya konsistensi tanah. Peningkatan daya dukung terbesar diperoleh pada tanah *very soft* dengan konfigurasi jarak *grid* 3D, tiga lapis fondasi, dan penggunaan cerucuk, yang menghasilkan peningkatan daya dukung sebesar 65,3% dibandingkan tanah tanpa perkuatan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi fondasi rakit memiliki peranan penting dalam meningkatkan daya dukung tanah lempung. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perancangan fondasi rakit pada tanah lempung lunak, khususnya sebagai alternatif perkuatan fondasi menggunakan material bambu.

Perlu diperhatikan bahwa penelitian ini menggunakan model fondasi rakit berbahan sedotan plastik sebagai simulasi bambu. Perbedaan sifat mekanik dan karakteristik permukaan antara sedotan plastik dan bambu kemungkinan memengaruhi mekanisme interaksi tanah dan bambu, sehingga kontribusi fondasi rakit terhadap peningkatan daya dukung pada penelitian ini dapat dimungkinkan berbeda dengan kondisi lapangan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan menggunakan cerucuk bambu sebenarnya atau model yang memiliki kesetaraan kekakuan dan kekasaran permukaan diperlukan untuk memvalidasi penelitian ini.

## 6. DAFTAR REFERENSI

Ahirwar, S. K., & Mandal, J. N. (2019). Behaviour of bamboo *grid*-reinforced soil bed. *International Journal of Geotechnical Engineering, 15*(7), 867–876. https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1550909

Akhila, K. S., Sankar, N., & Chandrakaran, S. (2021). Effect of Aperture Size on the Performance of Bamboo Mat Reinforced Soil Bed. *Journal of Natural Fibers, 19*(13), 6909–6920. https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1941480

Bergado, D. T., Anderson, L. R., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996). Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environments. ASCE Press.

Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design (5th ed.). McGraw-Hill.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.). Cengage Learning.

Han, J. (2015). Principles and Practice of Ground Improvement. Wiley.

Hegde, A., & Sitharam, T. G. (2015). Use of Bamboo in Soft-Ground Engineering and Its Performance Comparison with Geosynthetics: Experimental Studies. *Journal of Materials in Civil Engineering, 27*(9). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001224

Janssen, J. J. A. (2000). Designing and building with bamboo. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).

Kumar, A., Chandrakaran, S., & Sankar, N. (2019). Behaviour of model footing on bamboo mat-reinforced sand beds**.** *Soils and Foundations, 59*(5), 1560–1573. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.05.006

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior (3rd ed.). Wiley.

Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. John Wiley & Sons.

Nugroho, S. A., & Sibarani, A. S. (2013). Pengaruh penggunaan cerucuk terhadap kuat geser tanah lempung lunak. Jurnal APTEK, 5(2), 87–98.

Susila, E., & Agrensa, F. (2015). Case Study on Soft Soil Improvement using Innovative and Cost-Effective Reinforcing Techniques. *Journal of Engineering and Technological Sciences, 47*(2), 178–191. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.2.10

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.). John Wiley & Sons.