



Perancangan Tiang Granular Pada Fondasi Telapak Untuk Meningkatkan Daya Dukung

Azarya M. Maga^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Alva N. Sarajar^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^aazaryamaga021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^calva_sarajar@yahoo.com

Abstrak

Tanah lunak dengan daya dukung rendah dapat berdampak signifikan terhadap stabilitas dan keamanan struktur bangunan, terutama pada elemen fondasi. Salah satu metode yang efektif untuk mengatasi permasalahan ini adalah penggunaan tiang granular, yang berfungsi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan fondasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem tiang granular pada fondasi dangkal yang digunakan pada bangunan bertingkat rendah, serta untuk menganalisis perubahan daya dukung dan penurunan tanah sebelum dan sesudah penerapan tiang granular. Analisis dilakukan menggunakan data tanah yang diperoleh dari hasil uji Cone Penetration Test (CPT). Parameter tanah seperti indeks sifat fisik, kompresibilitas, dan kuat geser ditentukan melalui korelasi dengan data CPT. Beban struktur atas diperoleh dari hasil analisis struktur, dan dibebankan pada masing-masing fondasi. Sifat material tiang granular divariasikan berdasarkan nilai modulus deformasi, yaitu 25 MPa, 50 MPa, 75 MPa, dan 100 MPa. Geometri tiang granular yang digunakan dalam analisis memiliki diameter 800 mm dan panjang 6 meter. Perhitungan kapasitas dukung dan penurunan dilakukan menggunakan metode FHWA (1993) yang telah dimodifikasi oleh Chan dan Poon (2012, 2015). Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan tiang granular secara signifikan meningkatkan kapasitas dukung tanah hingga 2 kali lipat dibandingkan dengan fondasi dangkal tanpa perkuatan. Selain itu, penggunaan material dengan modulus deformasi yang lebih tinggi mampu secara efektif mengurangi penurunan fondasi. Penurunan fondasi tanpa perkuatan tercatat sebesar 320 mm, dan menurun menjadi 260 mm pada modulus deformasi 25 MPa, 180 mm pada 50 MPa, 150 mm pada 75 MPa, serta 130 mm pada 100 MPa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan tiang granular merupakan solusi yang efektif dan efisien untuk meningkatkan daya dukung dan mengurangi penurunan pada fondasi telapak di atas tanah lunak, khususnya untuk bangunan bertingkat rendah.

Kata kunci: tanah lunak, daya dukung, penurunan, tiang granular, fondasi telapak

1. Pendahuluan

Dalam dunia konstruksi, fondasi memegang peranan krusial sebagai elemen struktural yang menyalurkan beban bangunan ke lapisan tanah di bawahnya. Salah satu jenis fondasi yang umum digunakan adalah fondasi telapak (isolated footing), terutama pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah. Namun, tantangan sering muncul ketika tanah dasar memiliki daya dukung rendah atau mengalami penurunan berlebih, yang dapat membahayakan stabilitas struktur di atasnya. Untuk mengatasi permasalahan ini, berbagai metode perbaikan tanah telah dikembangkan, salah satunya adalah penggunaan tiang granular sebagai elemen perkuatan tanah di bawah fondasi telapak.

Tiang granular, yang terbuat dari material granular seperti kerikil atau batu pecah, berfungsi untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah dan mengurangi penurunan. Teknologi ini tergolong efektif dan ekonomis, karena memanfaatkan bahan lokal serta proses instalasi yang relatif sederhana dibandingkan metode perbaikan tanah lainnya. Artikel ini bertujuan untuk melakukan analisis daya dukung dan penurunan yang terjadi setelah penggunaan tiang granular. Hasil analisis diharapkan dapat memberikan pemahaman yang praktis dalam merancang sistem fondasi yang aman dan efisien pada kondisi tanah yang kurang mendukung.

2. Landasan Teori

Pondasi telapak merupakan salah satu jenis pondasi dangkal yang paling umum digunakan dalam konstruksi bangunan kecil hingga menengah. Namun, jika tanah di lokasi memiliki daya dukung rendah, fondasi telapak mungkin memerlukan dimensi yang lebih besar atau bahkan perlu diganti dengan jenis fondasi lain yang lebih stabil. Pada kondisi tanah seperti ini, penurunan (settlement) dapat terjadi segera setelah pemuatan, terutama sebelum proses konsolidasi berlangsung, dan umumnya dianalisis menggunakan pendekatan elastis dalam kondisi tidak terdrain.

Salah satu metode perbaikan tanah yang efektif untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan tiang granular, yaitu elemen vertikal yang terbuat dari agregat seperti kerikil atau batu pecah, dipasang dengan diameter dan kedalaman tertentu ke dalam lapisan tanah lunak. Tujuan utama penggunaan tiang granular adalah untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah serta mengurangi penurunan fondasi. Daya dukung tiang granular dapat dianalisis menggunakan pendekatan teoritis, salah satunya adalah teori yang dikembangkan oleh Hughes dan Withers (1974), yang mempertimbangkan aspek tekanan lateral dan kekuatan geser tanah di sekitarnya, yakni:

$$q_{ult} = K_{ps} \times \sigma'_{rL} = K_{ps} \times (\sigma_{rL} - u)$$

Tahapan menghitung desain tiang granular, sebagai berikut:

1. Konsep Sel Unit

Dalam perancangan tiang granular dengan pola persegi, digunakan pendekatan sel unit untuk menyederhanakan analisis interaksi antara tiang dan tanah sekitarnya. Untuk pola persegi, lingkaran ekuivalen digunakan sebagai representasi dari area pengaruh tiang. Diameter efektif lingkaran ekuivalen tersebut (D_e) dihitung dengan persamaan:

$$D_e = 1,13 \times s$$

dimana s adalah jarak dari pusat ke pusat antar tiang granular;

2 Rasio Pengganti Area (Area Replacement Ratio)

Rasio pengganti area (a_s) menyatakan proporsi luas tiang terhadap luas total sel unit, dan dihitung berdasarkan diameter tiang dan jarak antar pusat tiang dengan rumus:

$$a_s = f_1 \left(\frac{D}{s} \right)^2$$

Di mana D adalah diameter tiang granular, s adalah jarak antar pusat tiang, dan f_1 adalah konstanta yang bergantung pada pola pemasangan tiang. Untuk pola persegi, nilai f_1 adalah 0,78;

3. Mekanisme transfer beban dan rasio konsentrasi tegangan

Distribusi tegangan antara tiang granular dan tanah sekitarnya dapat dianalisis melalui rasio konsentrasi tegangan (n), yang didefinisikan sebagai:

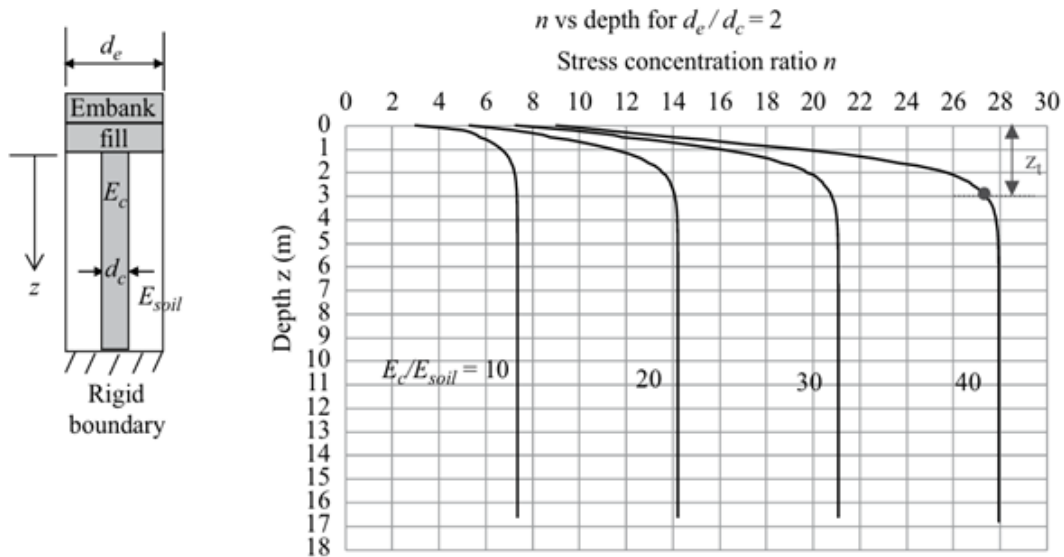
$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_{soil}}$$

Di mana σ_a adalah tegangan vertikal pada tiang granular, dan σ_{soil} adalah tegangan vertikal pada tanah di sekitarnya pada kedalaman yang sama. Nilai n bervariasi sepanjang panjang tiang, tergantung pada karakteristik deformasi dan kekuatan material tiang maupun tanah. Menurut FHWA (2017), nilai rasio konsentrasi tegangan umumnya berada dalam rentang 2 hingga 5.

Tahapan Menentukan Nilai Rasio Konsentrasi Tegangan (n) menurut Chai-Poon

1. Menentukan Nilai Rasio Konsentrasi Tegangan Awal (n awal)

Langkah pertama dalam menentukan rasio konsentrasi tegangan adalah menghitung nilai n awal menggunakan pendekatan elemen hingga elastis. Analisis ini dilakukan untuk kondisi tiang granular yang menopang timbunan pengisi, dengan asumsi bahwa tiang berdiri di atas lapisan dasar yang kaku. Hasil analisis ini menunjukkan distribusi n sepanjang kedalaman tiang. Lihat Gambar 1: Grafik rasio konsentrasi tegangan (n) sepanjang kedalaman tiang untuk kasus $d_e/d_c = 2$ (Jay Ameratunga dkk., 2021).



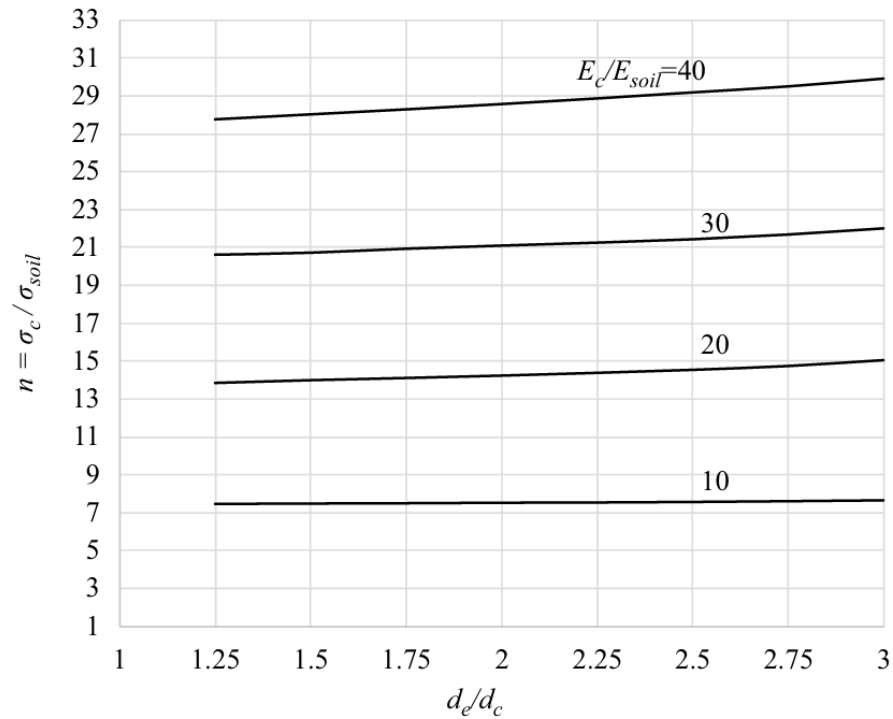
Gambar 1. Grafik Rasio Konsentrasi Tegangan (n) sepanjang Kedalaman Tiang untuk Kasus $d_e/d_c = 2$ (Jay Ameratunga dkk., 2021)

2. Menentukan Nilai Rasio Konsentrasi Tegangan Maksimum (n maks)

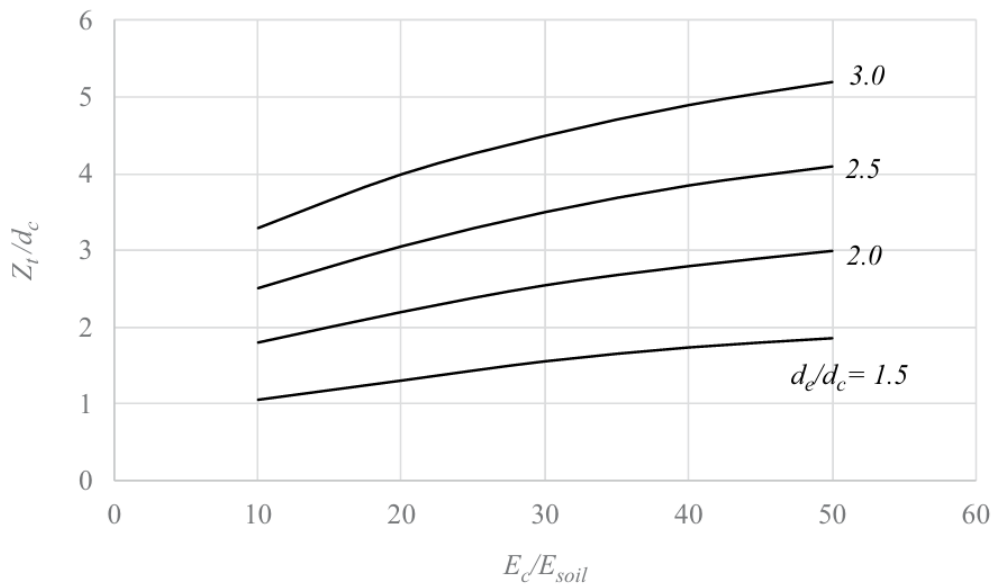
Selanjutnya, nilai n maksimum dihitung dengan solusi elemen hingga elastis berdasarkan kondisi regangan yang sama antara tiang dan tanah di sekitarnya. Analisis ini memberikan hubungan antara nilai n , rasio diameter ekuivalen terhadap diameter tiang (d_e/d_c), dan rasio modulus elastisitas material. Lihat Gambar 2: Grafik rasio konsentrasi tegangan (n) terhadap d_e/d_c dan rasio modulus elastisitas untuk fondasi kaku dengan kondisi regangan yang sama (Jay Ameratunga dkk., 2021).

3. Menentukan Kedalaman Kritis (Z_t)

Tahap ketiga adalah menentukan kedalaman kritis (Z_t), yaitu kedalaman di mana distribusi tegangan antara tiang dan tanah mulai berubah secara signifikan. Nilai Z_t diperoleh menggunakan solusi elemen hingga elastis yang sama seperti pada tahap pertama, namun dengan fokus pada identifikasi titik transisi tegangan vertikal. Lihat Gambar 3: Grafik nilai Z_t/d_c yang dinormalkan untuk berbagai rasio modulus (E_c/E_{soil}) dan d_e/d_c (Jay Ameratunga dkk., 2021).



Gambar 2. Grafik Rasio Konsentrasi Tegangan (n) terhadap d_e/d_c dan Rasio Modular untuk Fondasi Kaku dengan Kondisi Regangan yang sama (Jay Ameratunga dkk, 2021)



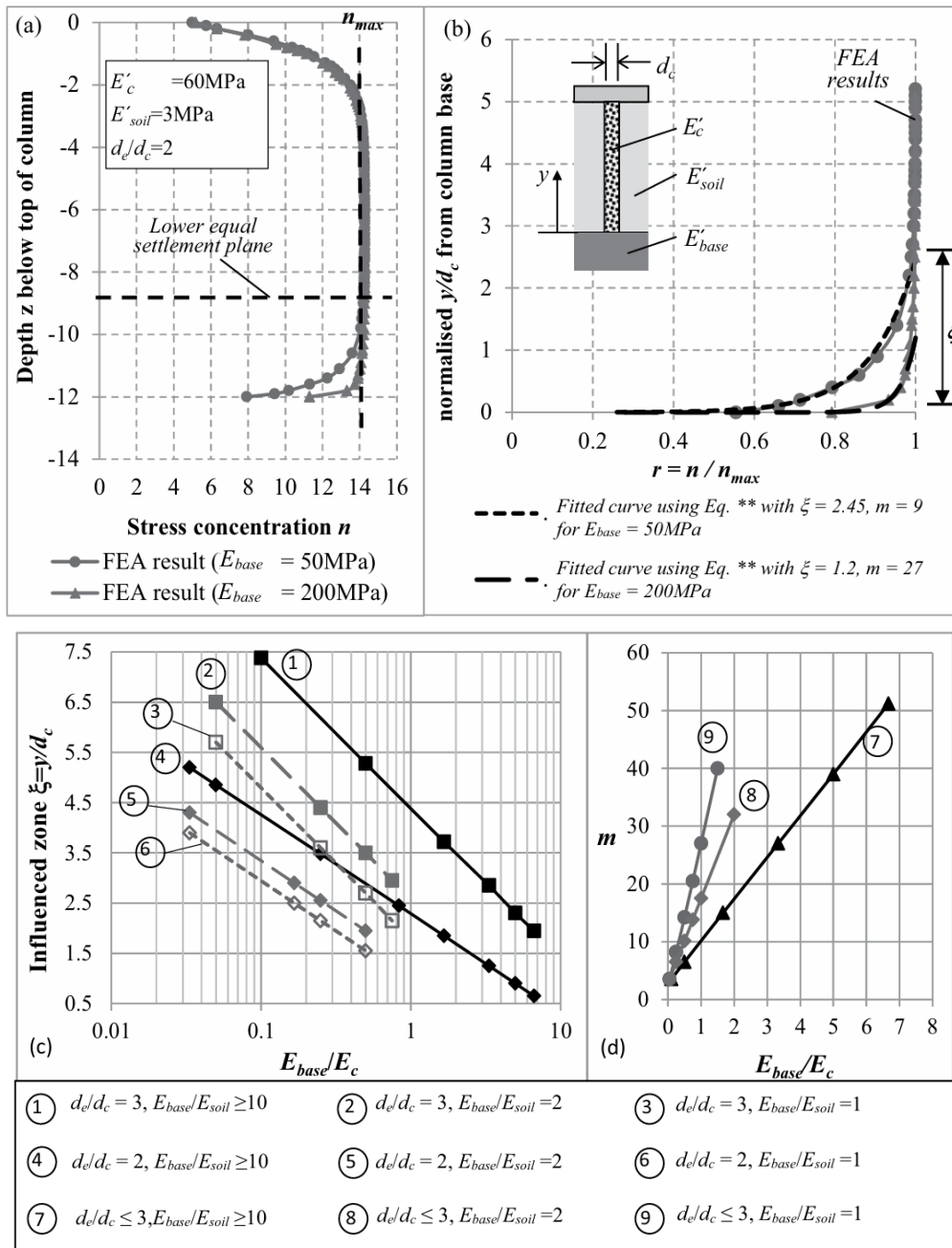
Gambar 3. Grafik nilai Z_l/d_c yang Dinormalkan untuk Rasio E_c/E_{soil} dan d_e/d_c yang Berbeda (Jay Ameratunga dkk., 2021)

4. Menentukan Nilai Rasio Pengurangan Konsentrasi Tegangan (r), Zona Pengaruh Ternormalisasi (ξ), dan Parameter m

Pada tahap terakhir, dilakukan analisis untuk kondisi tiang granular yang berdiri di atas tanah yang dapat dimampatkan, bukan dasar yang kaku. Rasio pengurangan konsentrasi tegangan (r) dihitung berdasarkan zona pengaruh yang dinormalisasi (ξ) dan parameter m , menggunakan persamaan:

$$r = 1 - \frac{1}{m} \left[\log \left(\frac{\xi}{\frac{y}{d_c}} \right) \right] \quad \left(\text{for } \frac{y}{d_c} \leq \xi \right)$$

Persamaan ini merepresentasikan pengaruh penurunan pada distribusi tegangan sepanjang kedalaman tiang. Lihat Gambar 4: Grafik untuk kondisi tiang granular di atas tanah yang dapat dimampatkan (Jay Ameratunga dkk., 2021).



Gambar 4. Grafik Tiang Granular dengan Dasar yang dapat Dimampatkan
(Jay Ameratunga dkk., 2021)

Dalam perencanaan tiang granular, langkah pertama adalah menentukan tegangan vertikal yang diterapkan akibat beban struktur ($\Delta\sigma$), yang dihitung dari perbandingan antara beban total dan luas fondasi. Nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung tegangan vertikal pada tiang granular (σ_c) dengan mempertimbangkan pengaruh interaksi antara tiang dan tanah sekitarnya. Tegangan vertikal tersebut dihitung menggunakan rumus berikut (Jay Ameratunga dkk., 2021):

$$\sigma_c = \frac{n}{[1 + (n - 1)a_s]} \Delta\sigma$$

dimana:

- n = rasio konsentrasi tegangan,
- a_s = rasio penggantian area,
- $\Delta\sigma$ = tegangan total akibat beban eksternal.

Setelah diperoleh nilai σ_c , langkah selanjutnya adalah menentukan tegangan vertikal efektif maksimum yang dapat ditahan oleh sistem, yaitu nilai terendah dari:

1. Daya dukung ultimit tiang granular (q_{ult}),
2. Tegangan vertikal batas tiang granular (σ_c), dan
3. Tegangan vertikal tanah sekitarnya (σ_{soil}).

Tegangan vertikal tanah sekitar tiang granular dihitung dengan persamaan berikut:

Nilai tegangan vertikal akhir granular didapat dari nilai yang lebih rendah antara nilai daya dukung tiang granular, q_{ult} dan nilai tegangan vertikal batas tiang granular, dan tegangan vertikal tanah sekitar tiang granular, σ_{soil}^* :

$$\sigma_{soil}^* = \frac{\Delta\sigma - \sigma_c^* \times a_s}{(1 - a_s)}$$

Dengan σ_c^* adalah tegangan vertikal pada tiang granular yang digunakan dalam perhitungan akhir. Selanjutnya, nilai akhir rasio konsentrasi tegangan (n_{final}) ditentukan dengan membandingkan tegangan vertikal akhir pada tiang granular dan tegangan vertikal pada tanah sekitarnya:

$$n = \frac{\sigma_c^*}{\sigma_{soil}^*}$$

Setelah tegangan akhir diketahui, penurunan (*settlement*) dari sistem tiang granular dapat dihitung. Penurunan utama berasal dari konsolidasi tanah lunak yang diperbaiki oleh keberadaan tiang granular. Estimasi penurunan dilakukan menggunakan rumus konsolidasi satu dimensi, dengan mempertimbangkan koefisien kompresibilitas volume (m_v), sebagai berikut:

$$s_t = m_v \mu_c \Delta\sigma H$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang bertujuan untuk memperoleh pemahaman teoritis mengenai berbagai aspek yang berkaitan dengan perancangan dan analisis fondasi telapak yang diperkuat dengan tiang granular. Studi literatur mencakup kajian tentang karakteristik fondasi telapak, metode penyelidikan tanah, konsep dasar tiang granular, teori daya dukung tanah, serta mekanisme dan analisis penurunan (*settlement*).

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, yang terdiri dari data sekunder berupa hasil uji Cone Penetration Test (CPT) dan denah konstruksi bangunan. Data CPT digunakan untuk menentukan parameter tanah yang diperlukan dalam analisis daya dukung dan penurunan, sementara denah konstruksi memberikan informasi mengenai dimensi fondasi dan beban yang bekerja.

Setelah data terkumpul, dilakukan perhitungan daya dukung fondasi dalam dua kondisi, yaitu:

1. Daya dukung fondasi sebelum perkuatan dengan tiang granular, dan
2. Daya dukung fondasi setelah perkuatan dengan tiang granular.

Analisis dilakukan untuk mengevaluasi peningkatan kapasitas dukung akibat penerapan tiang granular. Jika hasil perhitungan daya dukung telah memenuhi persyaratan teknis, tahap selanjutnya adalah melakukan pemodelan tiang granular pada lapisan tanah dan menghitung penurunan fondasi untuk kedua kondisi tersebut (dengan dan tanpa perkuatan).

Sebagai akhir dari penelitian, dilakukan penyusunan kesimpulan dan saran. Kesimpulan berfokus pada efektivitas penggunaan tiang granular dalam meningkatkan daya dukung fondasi telapak dan mengurangi penurunan. Saran diberikan sebagai rekomendasi teknis untuk penerapan tiang granular pada kondisi tanah lunak dalam proyek konstruksi di masa mendatang.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Korelasi Data Sondir

Hasil uji sondir Cone Penetration Test (CPT) digunakan mendapatkan parameter tanah melalui korelasi yang akan digunakan dalam analisis selanjutnya. Parameter tanah berdasarkan hasil korelasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Korelasi Data Sondir dan Parameter Tanah

| z m | Soil Description | γ kN/m ³ | ϕ deg | c' kN/m ² | c_u kN/m ² | E kN/m ² |
|--------|---|-------------------------------|---------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|
| 1,8 | Clay - Organic Soil | 15,81 | 25,54 | 0,96 | 9,60 | 588,40 |
| 5.6 | Clays : Clay to Silty Clay | 17,12 | 29,56 | 4,26 | 42,57 | 2787,15 |
| 6.2 | Silt Mixture : Clayey Silt and Silty Clay | 17,55 | 32,50 | 4,17 | 41,75 | 5883,99 |
| 7 | Sand Mixtures : Silty Sand to Sandy Silt | 17,89 | 34,94 | 2,71 | 27,11 | 10296,98 |
| 9 | Sands : Clean Sand to Silty Sands | 18,74 | 40,58 | 4,63 | 46,27 | 33832,94 |

4.2. Perhitungan Daya Dukung Tanah dengan Perkuatan Tiang Graular

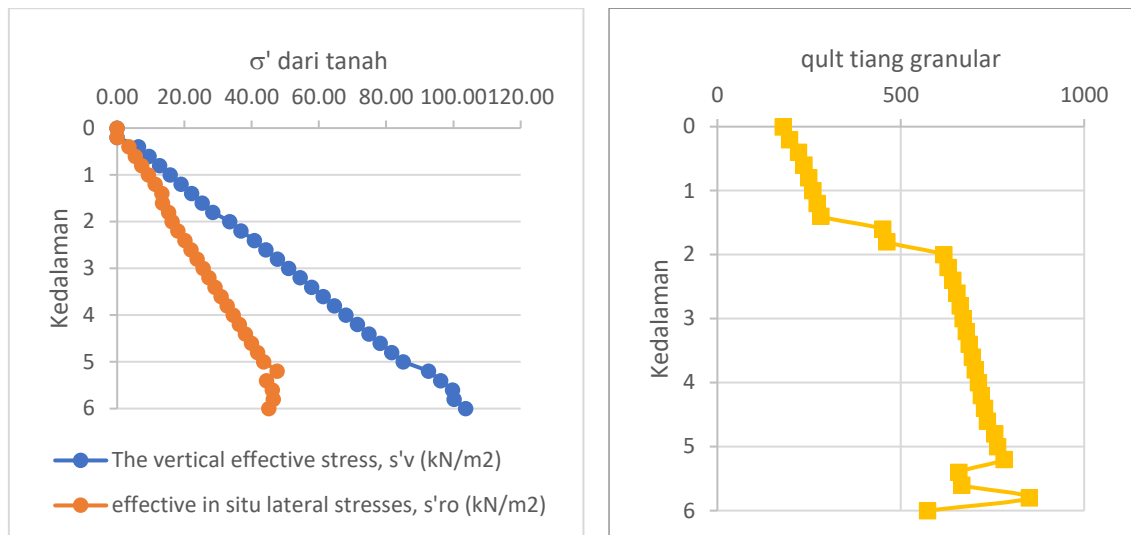
Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model fondasi telapak persegi yang memiliki dimensi sebagai berikut: kedalaman fondasi sebesar 2,5 meter, lebar fondasi 1,5 meter, dan panjang fondasi 1,5 meter. Dimensi ini mewakili fondasi bangunan skala kecil hingga menengah yang umum digunakan dalam konstruksi.

Untuk perkuatan tanah, digunakan tiang granular dengan panjang perencanaan sepanjang 6 meter. Pemilihan panjang ini didasarkan pada kedalaman lapisan tanah lunak yang membutuhkan perbaikan serta pertimbangan terhadap efisiensi teknis dan ekonomi. Tiang granular dirancang sebagai elemen vertikal yang dipasang di bawah fondasi telapak untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan.

Perhitungan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem fondasi, baik sebelum maupun sesudah penggunaan tiang granular. Evaluasi mencakup analisis daya dukung ultimit fondasi dan penurunan (settlement) total yang terjadi, sehingga dapat diketahui efektivitas penggunaan tiang granular dalam kondisi lapangan yang disimulasikan.

Tabel 2. Perhitungan Daya Dukung Tiang Granular

| z | σ'_v (kN/m ²) | ϕ_s (°) | K_0 | σ'_{ro} (kN/m ²) | h_v (m) | u | σ_{ro} (kN/m ²) | c_u (kN/m ²) | β | σ_{rL} (kN/m ²) | ϕ_p (°) | K_{ps} | $\sigma'_{rL} = \sigma_{rL} - u$ | q_{ult} (kN/m ²) |
|---|-------------------------------------|--------------|-------|--|--------------|-------|---------------------------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------------|--------------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | 0,00 | 28,99 | 0,52 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 7,68 | 5,56 | 42,75 | 38,00 | 4,20 | 42,75 | 180 |
| 1 | 15,81 | 24,30 | 0,59 | 9,31 | 0 | 0 | 9,31 | 10,27 | 5,14 | 62,12 | 38,00 | 4,20 | 62,12 | 261,12 |
| 2 | 33,50 | 30,81 | 0,49 | 16,34 | 0 | 0 | 16,34 | 42,18 | 3,09 | 146,86 | 38,00 | 4,20 | 146,86 | 617,34 |
| 3 | 51,05 | 29,97 | 0,50 | 25,55 | 1 | 9,81 | 35,36 | 44,28 | 3,02 | 169,24 | 38,00 | 4,20 | 159,43 | 670,22 |
| 4 | 68,07 | 29,55 | 0,51 | 34,50 | 2 | 19,62 | 54,12 | 44,86 | 3,00 | 188,91 | 38,00 | 4,20 | 169,29 | 711,66 |
| 5 | 85,09 | 29,16 | 0,51 | 43,63 | 3 | 29,43 | 73,06 | 47,12 | 2,93 | 211,29 | 38,00 | 4,20 | 181,86 | 764,48 |
| 6 | 103,70 | 34,40 | 0,44 | 45,11 | 4 | 39,24 | 84,35 | 22,95 | 3,98 | 175,61 | 38,00 | 4,20 | 136,37 | 573,26 |



Gambar 5. Kurva Hubungan Tegangan Vertikal Efektif (σ'_{vo}), Tegangan Efektif Lateral (σ'_{ro}) dan Daya Dukung Tiang Granular (q_{ult}) terhadap Panjang Tiang Granular

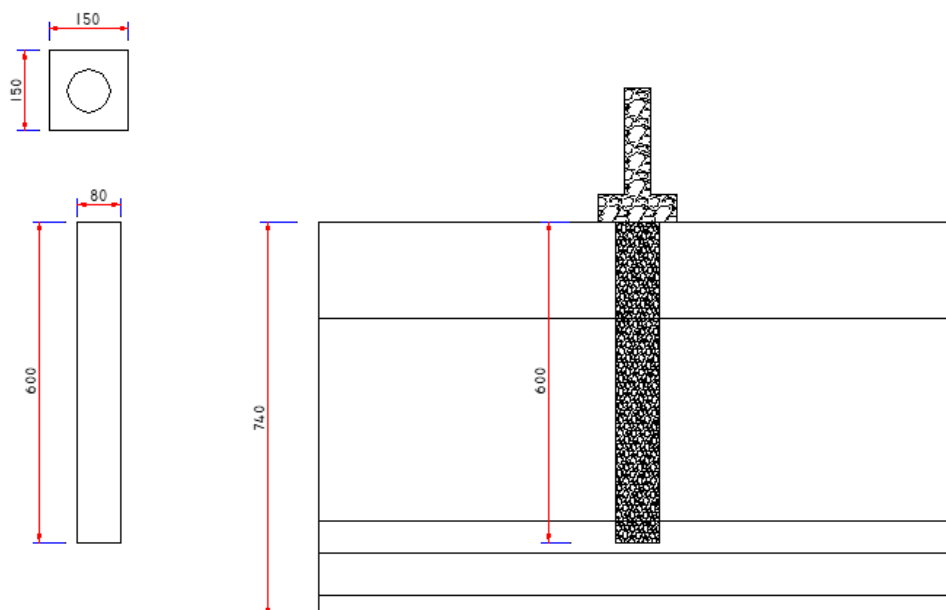
4.3. Konsep Desain Tiang Granular

Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan model fondasi telapak berbentuk persegi dengan dimensi sebagai berikut: kedalaman fondasi 2,5 meter, lebar 1,5 meter, dan panjang 1,5 meter. Fondasi ini direncanakan untuk menopang beban struktural pada kondisi tanah yang memerlukan kekuatan.

Sebagai upaya peningkatan kapasitas dukung tanah, digunakan sistem tiang granular dengan spesifikasi: diameter tiang sebesar 0,8 meter, jarak antar tiang (center-to-center spacing) sebesar 2 meter, dan panjang tiang 6 meter. Konfigurasi ini dirancang untuk mengoptimalkan distribusi tegangan dan mengurangi penurunan pada tanah dasar yang lunak.

Analisis beban dilakukan berdasarkan data dari 25 titik beban yang mewakili kondisi aktual di lapangan. Dari hasil analisis tersebut, diperoleh nilai beban maksimum sebesar 214,19 kN, yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam evaluasi kapasitas dukung fondasi, baik tanpa maupun dengan kekuatan tiang granular.

Seluruh parameter tersebut digunakan dalam tahapan analisis daya dukung dan penurunan fondasi untuk menilai efektivitas penggunaan tiang granular dalam meningkatkan stabilitas sistem fondasi telapak pada kondisi tanah yang memiliki daya dukung rendah.

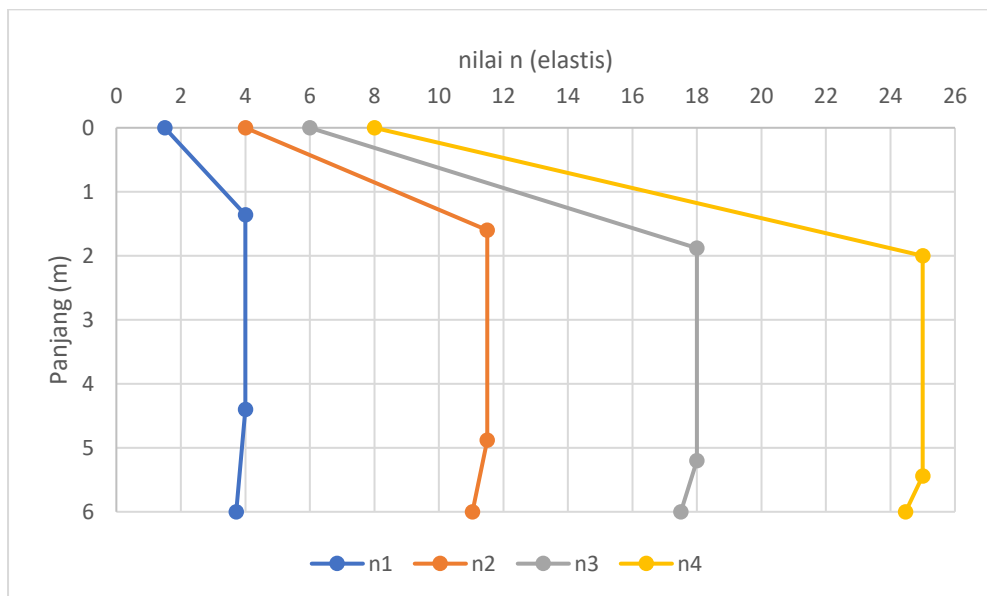


Gambar 6. Desain Tiang Granular

Dengan menggunakan nilai modulus deformasi tiang granular, E_c 25000-100000 kN/m² dan mengikuti tahapan perhitungan yang telah dijelaskan, diperoleh nilai rasio konsentrasi tegangan, n yang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Rasio Konsentrasi Tegangan (n)

| Modulus Deformasi Tiang (E_c) | nilai n | n awal | n maks | n akhir |
|--------------------------------------|-----------|----------|----------|-----------|
| kN/m ² | | | | |
| 25000 | 1 | 1,5 | 4 | 3,71 |
| 50000 | 2 | 4 | 11,5 | 11,04 |
| 75000 | 3 | 6 | 18 | 17,50 |
| 100000 | 4 | 8 | 25 | 24,47 |



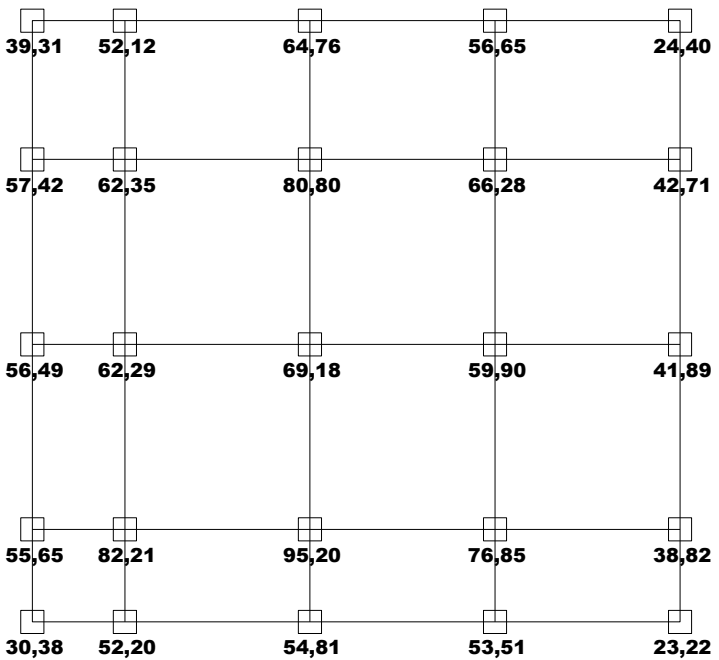
Gambar 7. Grafik Hubungan Nilai Rasio Konsentrasi Tegangan, n terhadap Panjang Tiang Granular

4.4. Perhitungan Penurunan dengan Perkuatan Tiang Granular

Pehitungan penurunan dilakukan dengan menggunakan nilai tegangan vertikal, $\Delta\sigma$ yang diterapkan pada fondasi.

$$\Delta\sigma = \frac{Q_{desain}}{A}$$

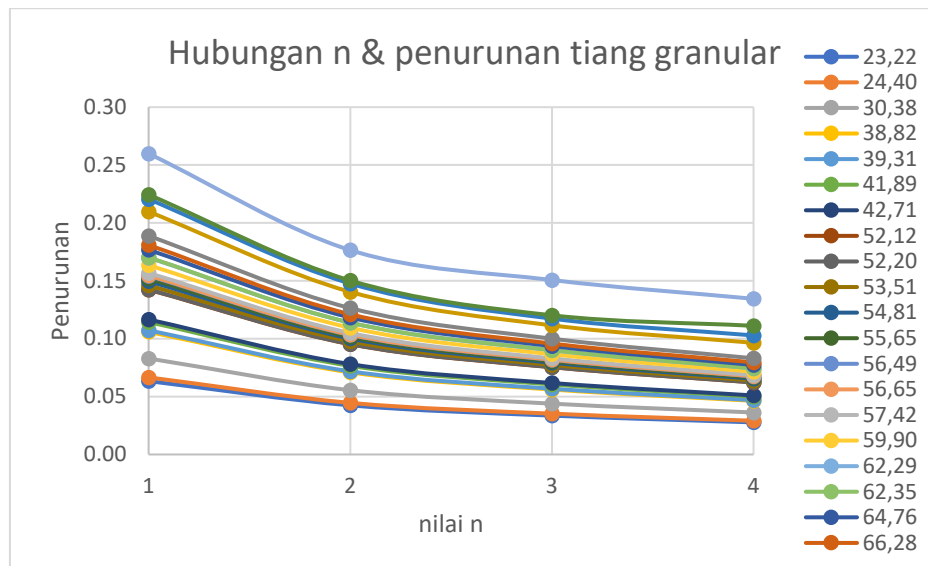
Perhitungan penurunan di setiap tegangan vertikal, $\Delta\sigma$ menggunakan variasi nilai rasio konsentrasi tegangan, n berdasarkan nilai modulus deformasi. Hasil perhitungan ditampilkan dalam Tabel 4.



Gambar 8. Denah Fondasi dan Tegangan Vertikal yang bekerja pada Fondasi, $\Delta\sigma$

Tabel 4. Penurunan di setiap Titik Fondasi pada Variasi Rasio Konsentrasi Tegangan, n

| $\Delta\sigma$ | $S_{soil} \text{ (m)}$ | | | | $S_t \text{ (m)}$ | | | |
|----------------|------------------------|------|------|------|-------------------|------|------|------|
| | n1 | n2 | n3 | n4 | n1 | n2 | n3 | n4 |
| 23,22 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,03 |
| 24,40 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,07 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| 30,38 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,04 |
| 38,82 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 0,05 |
| 39,31 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 0,07 | 0,06 | 0,05 |
| 41,89 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,11 | 0,08 | 0,06 | 0,05 |
| 42,71 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,12 | 0,08 | 0,06 | 0,05 |
| 52,12 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,14 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |
| 52,20 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,14 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |
| 53,51 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |
| 54,81 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,07 |
| 55,65 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,07 |
| 56,49 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,07 |
| 56,65 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,15 | 0,10 | 0,08 | 0,07 |
| 57,42 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,16 | 0,10 | 0,08 | 0,07 |
| 59,90 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,16 | 0,11 | 0,09 | 0,07 |
| 62,29 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,17 | 0,11 | 0,09 | 0,07 |
| 62,35 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,17 | 0,11 | 0,09 | 0,07 |
| 64,76 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,18 | 0,12 | 0,09 | 0,08 |
| 66,28 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,18 | 0,12 | 0,10 | 0,08 |
| 69,18 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,19 | 0,13 | 0,10 | 0,08 |
| 76,85 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,21 | 0,14 | 0,11 | 0,10 |
| 80,80 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,22 | 0,15 | 0,12 | 0,10 |
| 82,21 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,22 | 0,15 | 0,12 | 0,11 |
| 95,20 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,26 | 0,18 | 0,15 | 0,13 |



Gambar 9. Hubungan Rasio Konsentrasi Tegangan, n dan Penurunan, S berdasarkan $\Delta\sigma$

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai tegangan vertikal yang lebih rendah menghasilkan penurunan (settlement) yang lebih kecil. Hal ini berlaku baik untuk kondisi tanah alami (tanpa perkuatan) maupun pada kondisi dengan perkuatan menggunakan tiang granular. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penurunan yang terjadi akan meningkat seiring dengan bertambahnya tegangan vertikal, yang berasal dari beban struktur di atas fondasi. Selain itu, pengaruh modulus deformasi material tiang granular (E_c) terhadap rasio konsentrasi tegangan (n) dan penurunan fondasi juga dianalisis. Variasi nilai E_c digunakan untuk membandingkan perubahan nilai n dan respons penurunan tanah. Diketahui bahwa konfigurasi berikut digunakan dalam analisis:

- $n_1 \rightarrow E_c = 25.000 \text{ kN/m}^2$
- $n_2 \rightarrow E_c = 50.000 \text{ kN/m}^2$
- $n_3 \rightarrow E_c = 75.000 \text{ kN/m}^2$
- $n_4 \rightarrow E_c = 100.000 \text{ kN/m}^2$

Hasil menunjukkan bahwa nilai n_4 , yang berkaitan dengan E_c tertinggi (100.000 kN/m^2), menghasilkan penurunan paling kecil. Sebaliknya, nilai n_1 , dengan E_c terendah (25.000 kN/m^2), menunjukkan penurunan paling besar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin besar modulus deformasi material tiang granular, semakin kecil penurunan yang terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan tiang granular memainkan peran penting dalam mengurangi deformasi vertikal pada sistem fondasi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. **Efektivitas Diameter Tiang Granular.** Penggunaan tiang granular dengan diameter standar 0,8 m terbukti efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan pada fondasi telapak. Hasil analisis menunjukkan bahwa diameter tiang granular yang lebih besar dari 0,8 m dapat lebih lanjut meningkatkan daya dukung tanah dan menurunkan nilai penurunan. Sebaliknya, penggunaan diameter tiang granular yang lebih kecil dari 0,8 m menyebabkan penurunan yang lebih besar, sehingga kurang direkomendasikan untuk kondisi tanah lunak;
2. **Peningkatan Daya Dukung Tanah.** Daya dukung tanah sebelum perkuatan dengan tiang granular, pada beban maksimum, tercatat sebesar $275,08 \text{ kN/m}^2$. Setelah dilakukan perkuatan dengan tiang granular, daya dukung tanah meningkat secara signifikan menjadi rata-rata sebesar $561,27 \text{ kN/m}^2$. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kapasitas dukung sebesar 1 hingga 2 kali lipat dibandingkan kondisi tanpa perkuatan.
3. **Reduksi Penurunan Fondasi.** Variasi tegangan vertikal akibat beban serta perbedaan nilai rasio konsentrasi tegangan (n) yang dipengaruhi oleh modulus deformasi tiang granular (E_c)

menunjukkan bahwa penurunan fondasi mengalami penurunan sebesar 1 hingga 2 kali lebih kecil setelah perkuatan menggunakan tiang granular, dibandingkan dengan kondisi sebelum perkuatan. Semakin tinggi nilai E_c , semakin besar pengaruhnya dalam mengurangi penurunan fondasi.

Secara keseluruhan, penggunaan tiang granular sebagai metode perbaikan tanah pada fondasi telapak terbukti efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan, terutama pada bangunan bertingkat rendah yang didirikan di atas tanah lunak.

Referensi

- Aisah, Elpita., Dhiniati, Fameira. (2023). *Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal dengan Teori Terzaghi dan Mayerhof*. Jurnal Konstruksia, Volume 15, Nomor 1.
- Ameratunga, Jay., Sivakunga, Nagaratman., & Das, Braja M. (2021). *Soft Clay Engineering and Ground Improvement*. CRC Press.
- Aziz, Rafiki., Muhandi., & Putra, Agus Ika. (2022). *Perbaikan Tanah Lempung Dengan Metode Kolom Konfigurasi Segitiga dari Campuran Fly Ash dan Battom Ash*. Saintek e-Journal STT Pekanbaru, Vol. 10 No.1.
- Bureau of Indian Standards. (2003). IS 15284-1: *Design and construction for ground improvement – Guidelines, Part I: Stone column*. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- Dalle, Jeffray R., Manoppo, Fabian J., Rondonuwu, Steeva G. (2022). *Analisis Pondasi Konstruksi Sarang Laba-Laba Di Tanah Lunak*. TEKNO, Volume 20, Nomor 82.
- Department of Ground Engineering and Materials Science, University of Cantabria, Avda. (2017). *Modeling Stone Columns*. Jorge Castro.
- Farichah, Himatul. (2021). *Jurnal Reviwe : Metode Konstruksi Dan Perilaku Stone Column Sebagai Perkuatan Tanah Dasar Timbunan*. Agregat, Vol. 6, No. 1.
- Iskandar, Fuziah Fitriani., Hamdhan, Inra Noer. (2016). *Pemodelan Numerik Pada Perbaikan Tanah Menggunakan Stone Column Di Tanah Lempung Lunak Di Bawah Tanah Timbunan*. Jurusan Teknik Sipil Itenas, Vol. 2, No.1.
- Kalendesang, Natanael c., Ticoh, Jack H., Legrans, Roski R I. (2022). *Analisis Penurunan Fondasi Dangkal Menggunakan Program Settle 3D (Studi Kasus: SMA Eben Heazer Manado)*. TEKNO, Volume 20, Nomor 82.
- Kamila, Bella Stella Nisa'ul., Isnaniati., & Farichah, Himatul. (2022). *Studi Parametrik Pangaruh Stone Column Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak*. Agregat, Vol. 7, No. 1.
- R. D Barksdale & R. C. Bachus. 1983. *Design and Construction of Stone Columns . Vol I*. Institute of Technology Atlanta, Georgia.
- R. D Barksdale & R. C. Bachus. 1983. *Design and Construction of Stone Columns . Vol II, Appendixes*. Institute of Technology Atlanta, Georgia.
- Sanger, Van H., Sarajar, Alva N., Mandagi, Agnes T. (2024). *Analisis Daya Dukung Tanah Pada Pekerjaan Pembangunan RS. GMM Kaupusan Langowan*. TEKNO, Volume 22, No.89.