



Perancangan Tiang Granular Pada Timbunan Tanah Di Preservasi Ruas Jalan Piramid-Tiom Km 54+200, Kab. Lanny Jaya, Provinsi Papua

Arzhi D. Maggie^{#a}, Alva N. Sarajar^{#b}, Roski R. I. Legrans^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^aarzhi@gamil.com, ^balvasarajar@unsrat.ac.id, ^clegransroski@unsrat.ac.id

Abstrak

Tanah lunak dengan daya dukung rendah sering menjadi permasalahan utama dalam proyek konstruksi, karena dapat menimbulkan penurunan berlebihan maupun keruntuhan yang mengancam stabilitas dan keamanan struktur. Salah satu solusi yang efektif untuk mengatasi kondisi tersebut adalah melalui perbaikan tanah dengan metode tiang granular. Metode ini dilakukan dengan menambahkan material granular ke dalam endapan tanah lunak sehingga terbentuk elemen perkuatan yang mampu meningkatkan kapasitas dukung dan mengurangi deformasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penggunaan tiang granular dalam meningkatkan daya dukung tanah serta mengurangi penurunan pada ruas jalan Piramid-Tiom km 54+200 Kab. Lanny Jaya, Provinsi Papua dengan dasar tanah lunak. Analisis dilakukan menggunakan data hasil uji Standard Penetration Test (N-SPT) dan desain konstruksi yang telah direncanakan. Perhitungan meliputi evaluasi daya dukung dan penurunan tanah sebelum dan sesudah pemasangan tiang granular. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan tiang granular mampu meningkatkan daya dukung tanah secara signifikan, dengan nilai peningkatan mencapai 543,905 dibandingkan kondisi sebelum 361,527. Selain itu, penurunan tanah dapat dikurangi dengan selisih antara 0,003–0,015 meter, sehingga memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kinerja struktur jalan di atas tanah lunak. Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan tiang granular merupakan metode perbaikan tanah yang efektif dan dapat diandalkan dalam meningkatkan stabilitas serta mengurangi risiko deformasi pada konstruksi di atas tanah lunak.

Kata kunci: perbaikan tanah, tiang granular, daya dukung, penurunan, jalan Piramid-Tiom

1. Pendahuluan

Ruas Jalan Piramid-Tiom KM 54+200 di Kabupaten Lanny Jaya, Provinsi Papua, merupakan infrastruktur vital yang menghubungkan wilayah terpencil dengan pusat ekonomi dan layanan publik. Namun, kondisi secara geografis Papua yang didominasi oleh topografi bergelombang, tanah lunak, dan curah hujan tinggi menyebabkan degradasi jalan, seperti amblesan, retakan, dan ketidakstabilan timbunan. Tanah dasar (*subgrade*) yang bersifat lunak dan lembek di lokasi ini tidak mampu menahan beban timbunan dan lalu lintas, sehingga mempercepat kerusakan struktur jalan.

Metode konvensional seperti penggantian tanah (*soil replacement*) seringkali kurang efektif di daerah dengan akses terbatas dan biaya logistik tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan inovatif seperti tiang granular untuk meningkatkan daya dukung tanah dan memperkuat struktur timbunan. Tiang granular dipilih karena mampu mengatasi masalah konsolidasi tanah lunak melalui sistem drainase vertikal dan penguatan mekanis, sekaligus meminimalkan biaya dan waktu konstruksi dibandingkan metode lain.

Penelitian ini bertujuan merancang timbunan tanah pengganti yang diintegrasikan dengan tiang granular guna memastikan preservasi jalan yang berkelanjutan di ruas tersebut.

Tiang Granular merupakan upaya penggalan yang dilakukan untuk mengganti sebagian tanah yang akan digunakan sebagai dasar konstruksi dengan kolom vertikal yang dipadatkan. Fungsi Utama Pemasangan tiang granular adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah yang

kurang baik sehingga dapat menerima beban yang lebih besar dan settlement yang terjadi akan berkurang.

Maka dari itu, penelitian ini berfokus pada penggunaan tiang granular pada jalan Piramid-Tiom KM 54+200 dalam meningkatkan daya dukung tanah, dan memperkuat struktur timbunan dan mengurangi kerusakan jalan di daerah pegunungan Papua.

2. Landasan Teori

Tanah merupakan dasar suatu struktur atau konstruksi, baik itu konstruksi bangunan gedung, konstruksi jalan, maupun konstruksi yang lainnya. Tanah di alam terdiri dari campuran butiran-butiran mineral dengan atau tanpa kandungan bahan organik. Butiran-butiran dengan mudah dipisah-pisahkan satu sama lain dengan air. Tanah berasal dari pelapukan batuan, yang prosesnya dapat secara fisik maupun kimia.

Salah Satu Cara untuk melakukan perbaikan tanah dan perkuatan tanah yang efektif untuk mengatasi kasus ini dengan menggunakan Tiang granular, dengan daya dukung vertikal yang terdiri dari agregat kecil seperti kerikil atau batu pecah, yang dipasangkan dengan diameter dan kedalaman yang telah ditentukan oleh tanah lunak. Tujuan utama penggunaan dengan tiang granular adalah meningkatkan kapasitas daya dukung tanah dan mengurangi penurunan pada tanah. dengan teori perluasan rongga untuk tiang granular panjang yang mengalami kegagalan pembembangakan, dengan mempertimbangkan keseimbangan plastic dalam material tiang granular, Hughes dan Wiers (1974) bahwa kapasitas maksimum tiang granular yang mengalami kegagalan membengkak dengan menggunakan persamaan berikut:

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

Tahapan desain tiang granular, sebagai berikut:

1. Diameter Ekuivalen (D_e) pada Pola Segitiga Sama Sisi

Dalam perancangan tiang granular dengan pola segitiga sama sisi, digunakan untuk mendekati sel unit dan menyederhanakan analisis interaksi antara tiang granular dengan tanah lunak disekitarnya. Untuk pola segitiga sama sisi, lingkaran ekuivalennya digunakan sebagai representasi di area pengaruh tiang granular. Diameter efektif lingkaran ekuivalen yaitu (D_e), dihitung dengan persamaan:

$$D_e = 1,05 \times s$$

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

2. Rasio Pengganti Area (Area Replacement Rasio)

Rasio pengganti area (a_s) dapat dinyatakan dalam diameter dan jarak tiang granular, untuk menyatakan proporsi luas tiang terhadap sel unit dengan persamaan sebagai berikut:

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

dimana D adalah diameter tiang granular dan s adalah jarak pusat ke pusat tiang granular. f_1 adalah konstanta yang bergantung pada pola pemasangan tiang granular. Untuk pola segitiga sama sisi, $f_1 = 0,91$;

3. Mekanisme Transfer Beban dan Rasio Konsentrasi Tegangan

Distribusi tegangan antar kolom dan tanah dapat diukur dengan rasio konsentrasi tegangan (n), yang didefinisikan sebagai berikut:

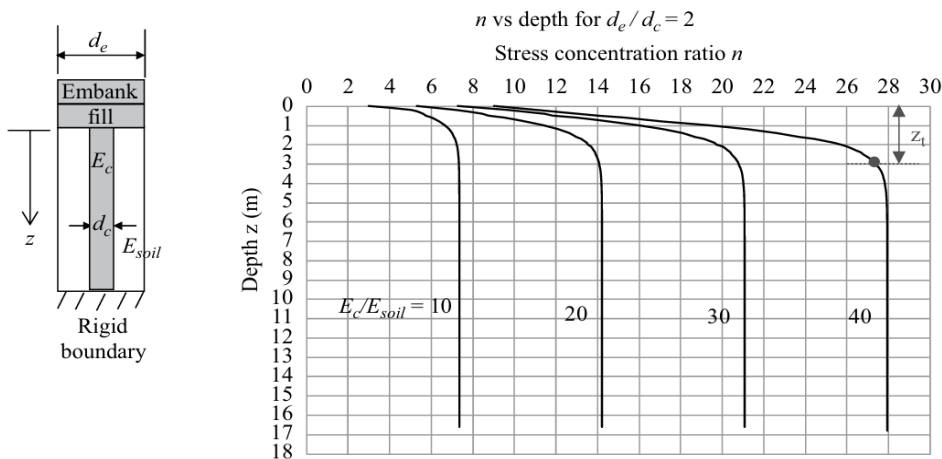
$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_{soil}}$$

Di mana σ_c adalah tegangan vertikal pada tiang granular, dan adalah tegangan vertikal pada tanah di sekitarnya pada kedalaman yang sama. Dalam FHWA (2017) menunjukkan bahwa nilai yang diukur dari rasio konsentrasi tegangan (n), umumnya berada di antara 2 dan 5. Untuk desain awal, FHWA (2017) merekomendasikan rasio 2,5 untuk digunakan.

Tahapan menentukan Nilai Rasio konsentrasi Tegangan (n)

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 $d_e/d_c = 2$.*



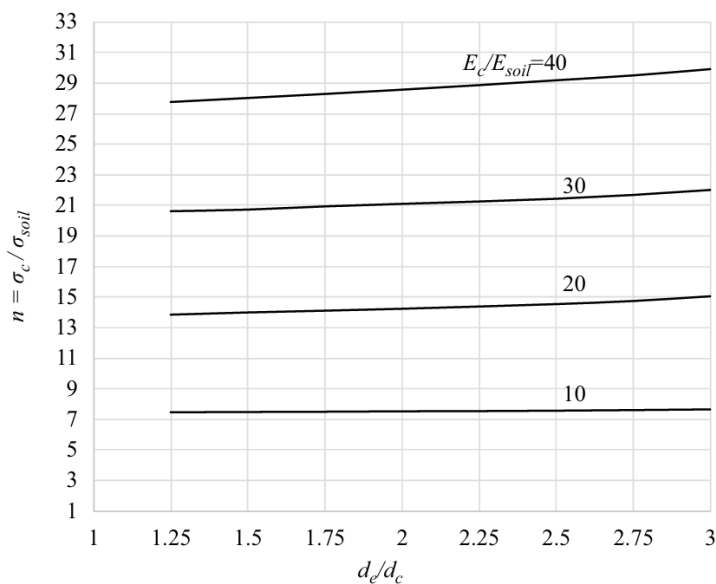
Gambar 1. Grafik Rasio Konsentrasi Tegangan (n) sepanjang Kedalaman Kolom untuk Kasus $d_e/d_c = 2$ (berdasarkan solusi elemen hingga elastis dari tiang granular yang mendukung timbunan pengisi).

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

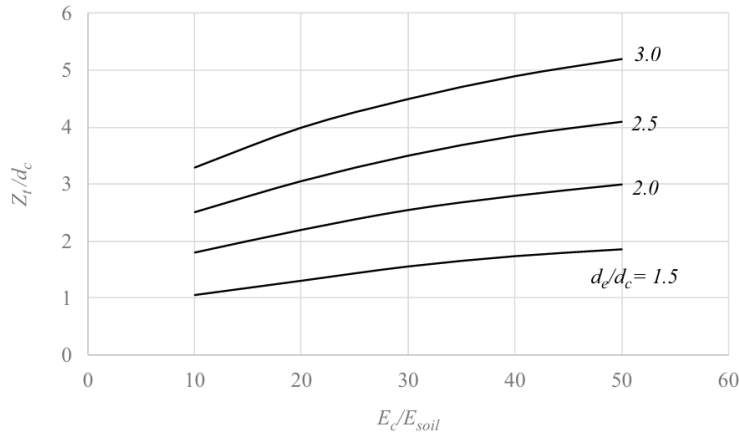
Selanjutnya, nilai n maksimum dihitung dengan solusi elemen hingga elastis berdasarkan kondisi regangan yang sama antara tiang di sekitarnya. Analisis ini memberikan hubungan antara nilai n , rasio diameter ekuivalen terhadap diameter tiang (d_e/d_c), dan rasio modulus elastisitas material. *Lihat Gambar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

3. Menentukan Kedalam 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 .*



Gambar 2. Grafik Rasio Konsentrasi Tegangan n terhadap d_e/d_c dan Rasio Modular untuk Fondasi Kaku dengan kondisi regangan yang sama (berdasarkan solusi elemen hingga elastis).



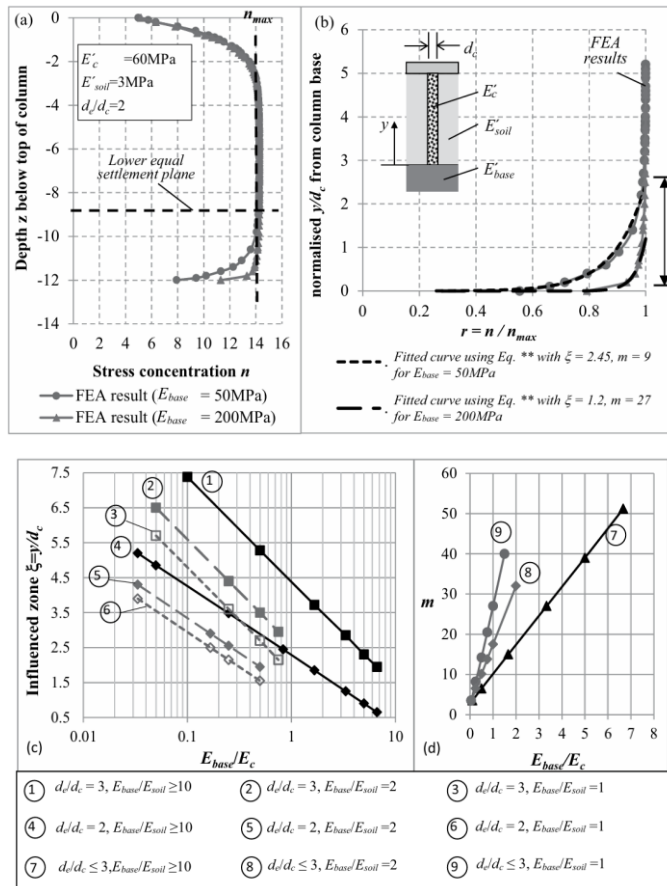
Gambar 3. Grafik Nilai Z_c/d_c yang Dinormalkan untuk Rasio E_c/E_{soil} dan d_c/d_c yang Berbeda

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:

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

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.



Gambar 4. Tiang Granular dengan Dasar yang dapat Dimampatkan - Solusi Elastis

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:

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

- 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 system, 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 tiang granular didapatkan 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:

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

3. Metode Penelitian

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

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, yang terdiri dari data sekunder berupa hasil Soil penetration Test (SPT) dan struktur denah jalan raya. Data SPT digunakan untuk menentukan parameter tanah yang diperlukan dalam analisis daya dukung dan penurunan, sementara denah struktur jalan raya memberikan informasi mengenai berat beban jalan raya. Setelah data terkumpul, dilakukan perhitungan daya dukung fondasi dalam dua kondisi yaitu:

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

Analisis dilakukan untuk mengevaluasi peningkatan kapasitas dukung akibat penertapan tiang granular. Jika hasil perhitungan daya dukung telah memenuhi persyaratan teknik, tahap

selanjutnya adalah melakukan pemodelan tian granular pada lapisan tana dan menghitung penurunan tanah dengan dua kondisi (dengan dan tanpa perkuatan tiang granular).

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

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Korelasi Data Sondir

Hasil uji sondir Soil Cone Penetration Test (SPT) digunakan mendapatkan parameter tanah melalui korelasi yang 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	Timbunan	0	0	0	0	0
3,5	Lempung	18	15	10	103	8655
2	Lempung pasiran campur batu	21	27	29	290	24487
4,5	Batu Lempung	21	27	30	300	25331

4.2. Perhitungan Daya Dukung dengan perkuatan Tiang Granular

Perhitungan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model tiang granular segitiga sama sisi yang memiliki ukuran sebagai berikut : tiang granular dengan keliling diameter 0,75 meter dan jarak antar titik tengah tiang granular dengan tiang granular lainnya sebesar 3 meter (*as ke as*). Dimensi ini mewakili tiang granular dengan skala yang sering digunakan dalam konstruksi jalan.

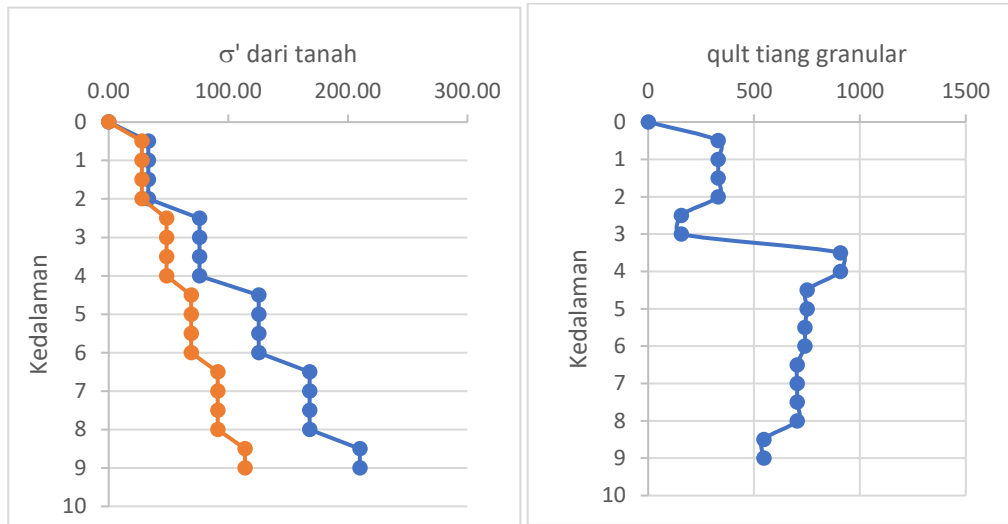
Untuk perkuatan tanah, digunakan tiang granular dengan perencanaan sepanjang 4,5 meter. Pemilihan panjang ini didasarkan pada kedalaman lapisan tanah lunak yang membutuhkan perbaikan serta pertimbangan terhadap efisiensi teknis dan ekonomi. Tiang granular dirancang sebagai elemen vertikal yang dipasang langsung pada lapisan tanah untuk meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan yang drastis.

Perhitungan dilakukan untuk mengevaluasi perkuatan, baik sebelum maupun sesudah penggunaan tiang granular. Evaluasi mencakup analisis daya dukung ultimit dan penurunan (*Settlement*) yang terjadi, sehingga dapat diketahui efektivitas dari penggunaan tiang granular dalam kondisi lapangan yang di rekayasakan.

Tabel 2. Perhitungan Daya Dukung Tiang Granular

z (m)	σ'_v (kN/m ²)	ϕ (°)	Ko	σ'_{ro} (kN/m ²)	hw (m)	u	σ_{ro} (kN/m ²)	c_u (kN/m ²)	b	σ_{rL} (kN/m ²)	ϕ_p (°)	K_{ps}	$\sigma'_{rL} = \sigma_{rL} - u$	q_{ult} (kN/m ²)
0	0,00	0,00	1,00	0,000	0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0
0,5	33,00	8,94	0,84	27,87	0	0	27,87	102,50	1,81	213,06	45	1,55	213,06	330,64
1	33,00	8,94	0,84	27,87	0	0	27,87	102,50	1,81	213,06	45	1,55	213,06	330,64
1,5	33,00	8,94	0,84	27,87	0	0	27,87	102,50	1,81	213,06	45	1,55	213,06	330,64
2	33,00	8,94	0,84	27,87	0	0	27,87	102,50	1,81	213,06	45	1,55	213,06	330,64
2,5	76,00	21,26	0,64	48,44	0	0	48,44	102,50	1,81	233,63	45	0,67	233,63	155,39
3	76,00	21,26	0,64	48,44	0	0	48,44	102,50	1,81	233,63	45	0,67	233,63	155,39
3,5	76,00	21,26	0,64	48,44	0	0	48,44	290,00	1,81	572,38	45	1,59	572,38	907,55
4	76,00	21,26	0,64	48,44	0	0	48,44	290,00	1,81	572,38	45	1,59	572,38	907,55
4,5	125,40	26,76	0,55	68,94	0	0	68,94	290,00	0,30	155,56	45	4,83	155,56	750,87
5	125,40	26,76	0,55	68,94	0	0	68,94	290,00	0,30	155,56	45	4,83	155,56	750,87

5,5	125,40	26,76	0,55	68,94	0	0	68,94	300,00	0,30	158,54	45	4,66	158,54	739,31
6	125,40	26,76	0,55	68,94	0	0	68,94	300,00	0,30	158,54	45	4,66	158,54	739,31
6,5	168,00	27,20	0,54	91,20	0	0	91,20	300,00	0,25	166,05	45	4,24	166,05	703,58
7	168,00	27,20	0,54	91,20	0	0	91,20	300,00	0,25	166,05	45	4,24	166,05	703,58
7,5	168,00	27,20	0,54	91,20	0	0	91,20	300,00	0,25	166,05	45	4,24	166,05	703,58
8	168,00	27,20	0,54	91,20	0	0	91,20	300,00	0,25	166,05	45	4,24	166,05	703,58
8,5	210,00	27,20	0,54	114,00	0	0	114,00	300,00	0,25	188,85	45	2,89	188,85	545,54
9	210,00	27,20	0,54	114,00	0	0	114,00	300,00	0,25	188,85	45	2,89	188,85	545,54

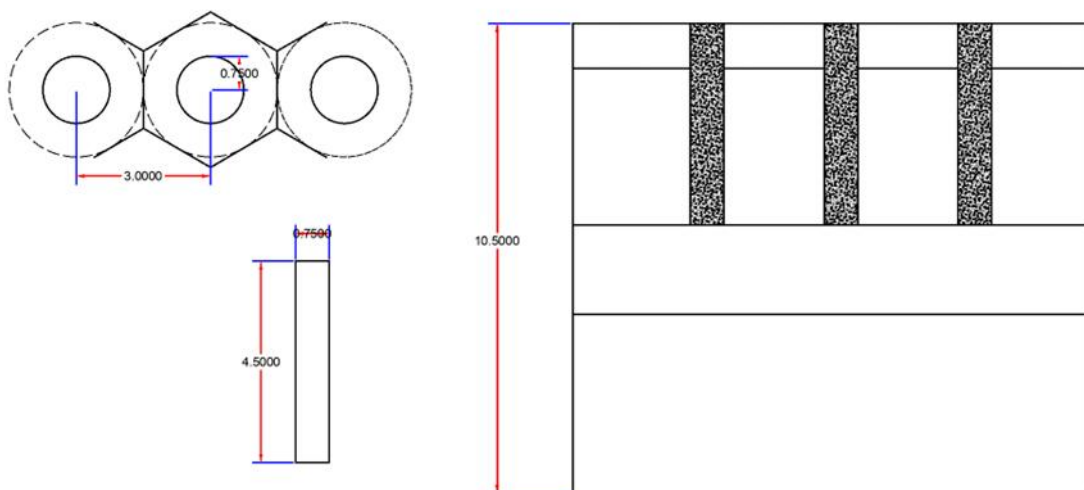


Gambar 5. Kurva Hubungan tegangan Vertikal Efektif (σ'_{vo}), Tegangan efektif Lateral (σ'_{ro}) dan Daya Dukung Tiang Granular (q_{ult}) terhadap Panjang Tiang Granular

4.3. Konsep Desain Tiang Granular

Perhitungan pada Penelitian ini dilakukan Menggunakan Tiang granular dengan model Segitiga sama sisi dengan upaya meningkatkan kapasitas daya dukung tanah, dengan dimensi sebagai berikut : tiang granular dengan keliling diamter 0,75 meter dan jarak antar titik tengah tiang granular dan titik tengah tiang granular lainnya sebesar 3 meter (as to as) dan panjang tiang 4,5 meter. Tiang granular ini direncanakan untuk memaksimalkan perkuatan pada tanah dasar agar tidak terjadi penurunan yang signifikan.

Seluruh paramter tersebut digunakan dalam tahapan analisis daya dukung dan penurunan tanah untuk menilai penggunaan tiang granular dalam meningkatkan kondisi tanah yang memiliki daya dukung yang rendah.

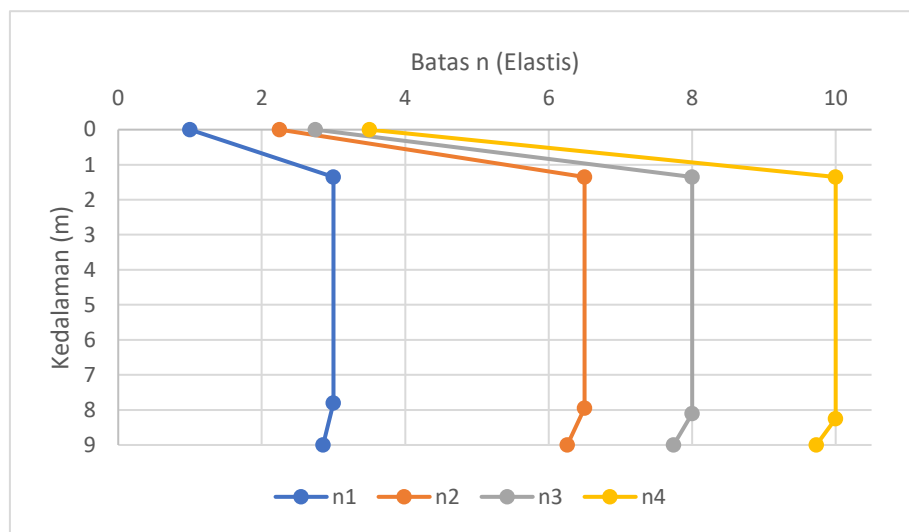


Gambar 6. Desain Tiang Granular

Dengan menggunakan nilai rasio modulus tiang granular, E_c 60000-120000 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
60000	2	1	3	2,86
80000	2,5	2,25	7	6,26
100000	3	2,75	8	7,74
120000	4	3,5	10	9,73



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 vertical, $\Delta\sigma$ yang diterapkan pada tiang granular.

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

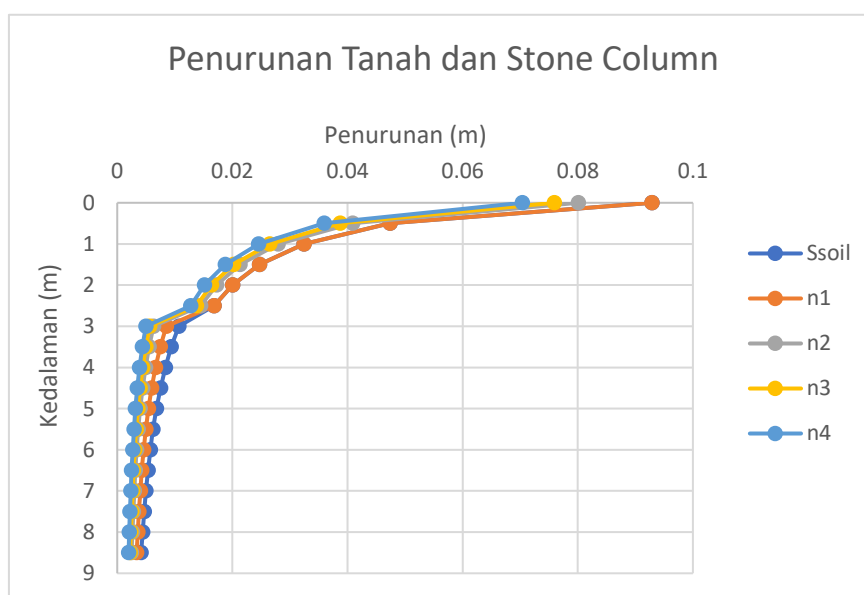
Perhitungan penurunan di setiap tegangan vertikal, $\Delta\sigma$ menggunakan variasi nilai rasio konsentrasi tegangan. dimana, $\Delta\sigma$ adalah tegangan vertikal, H adalah ketebalan sublapisan, μ_c adalah koefisien konsentrasi tegangan tiang granular dan m_v adalah koefisien kompresibilitas volume yang bisa dihitung dengan persamaan:

$$S_c = \frac{C_c \times H}{1 + e_0} \times \log\left(\frac{\Delta\sigma + \sigma'_0}{\sigma'_0}\right)$$

dimana e_0 yang adalah angka pori dapat dari hasil uji lab.

Tabel 4. Tabel Penurunan Tanah sebelum dan sesudah menggunakan Tiang Granular

Kedalaman (m)	z m	Cc	e ₀ Mpa	γ kN/m ³	σ' ₀ kN/m ³	Ds kN/m ²	H m	S _{soil} m	μ _c kN/m ²	St m
0	0				0		0,5	0	1,00	0
0,5	0,25				1,985		0,5	0,092909	1,00	0,092909
1	0,75				5,955		0,5	0,047409	1,00	0,047409
1,5	1,25			17,75	9,925		0,5	0,03243	1,00	0,03243
2	1,75				13,895		0,5	0,024733	1,00	0,024733
2,5	2,25				17,865		0,5	0,020014	1,00	0,020014
3	2,75				21,835		0,5	0,016816	1,00	0,016816
3,5	3,25				36,0425		0,5	0,010711	0,80	0,008528
4	3,75			20,90	41,5875		0,5	0,009384	0,80	0,007471
4,5	4,25	0,59	1,03		47,1325	6,67	0,5	0,008349	0,80	0,006648
5	4,75				52,6775		0,5	0,007521	0,80	0,005988
5,5	5,25				58,7475		0,5	0,006784	0,80	0,005401
6	5,75				64,3425		0,5	0,006222	0,80	0,004954
6,5	6,25				69,9375		0,5	0,005746	0,80	0,004575
7	6,75			21,00	75,5325		0,5	0,005338	0,80	0,00425
7,5	7,25				81,1275		0,5	0,004984	0,81	0,004027
8	7,75				86,7225		0,5	0,004674	0,81	0,003777
8,5	8,25				92,3175		0,5	0,004401	0,81	0,003556
9	8,75				97,9125		0,5	0,004157	0,81	0,003359

**Gambar 8.** Hubungan Rasio Konsentrasi Tegangan, n dan penurunan, S berdasarkan $\Delta\sigma$

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai tegangan vertikal yang lebih menghasilkan penurunan (*settlement*) yang lebih kecil. Hal ini berlaku baik kondisi tanah (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. Selain itu, pengaruh rasio modulus tiang granular (E_c) terhadap konsentrasi tegangan (n) dan penurunan tanah juga dianalisis. Variasi nilai E_c . Digunakan untuk membandingkan perubahan nilai n dan respon penurunan tanah. Diketahui bahwa konfigurasi berikut digunakan dalam analisis:

- **n1** → $E_c = 60.000 \text{ kN/m}^2$
- **n2** → $E_c = 80.000 \text{ kN/m}^2$
- **n3** → $E_c = 100.000 \text{ kN/m}^2$
- **n4** → $E_c = 120.000 \text{ kN/m}^2$

5. Kesimpulan

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

1. Efektivitas Diameter Tiang Granular. Penggunaan tiang granular dengan diameter standar 0,75 meter terbukti efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan pada tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa diameter tiang granular yang lebih besar dari 0,75 meter dapat digunakan lebih lanjut dalam meningkatkan daya dukung tanah dan menurunkan nilai dari penurunan. Sebaliknya, penggunaan diameter tiang granular yang lebih kecil dari 0,75 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 361,527 kN/m². Setelah dilakukan perkuatan dengan tiang granular, daya dukung tanah meningkat secara signifikan menjadi rata-rata sebesar 543,905 kN/m². Hal ini menunjukkan adanya peningkatan kapasitas dukung sebesar 1-2 kali lipat dibandingkan kondisi tanpa perkuatan.
3. Dengan menggunakan nilai tegangan vertikal yang berbeda-beda berdasarkan beban dan nilai n berdasarkan nilai E_c yang berbeda, penurunan yang terjadi 1-2 kali lebih kecil setelah perbaikan dengan menggunakan tiang granular dibandingkan sebelum menggunakan tiang granular.

Secara keseluruhan, penggunaan tiang granular sebagai metode perbaikan dan perkuatan tanah terbukti efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi penurunan pada tanah.

Referensi

- Ameratunga, Jay., Sivakunga, Nagaratman., & Das, Braja M. (2021). *Soft Clay Engineering and Ground Improvement*. CRC Press.
- Abdul Hakam & noerlailie. (2014). *Analisis Penurunan Tanah Lempung yang Diperkuat dengan Tiang Granular (Granular Pile)*. JRS. Vol. 10, No. 1.
- Bureau of Indian Standards. (2003). IS 15284-1: *Design and construction for ground improvement – Guidelines, Part I: Tiang granular*. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- Department of Ground Engineering and Materials Science, University of Cantabria, Avda. (2017). *Modeling Tiang granulars*. Jorge Castro.
- FHWA (2017) U.S. Department of Transportation federal Highway Administration (April 2017) – *Design and Construction of stone Column, Vol 1. Report No. FHWA-NHI-16-028. Authors V.R. Schaefer, R.R. Berg, J.G. Collin, B.R. Christopher, J.A. DeMaggio, G.M. Filz, D.A Bruce and D.Ayala.*
- Farichah, Himatul. (2021). *Jurnal Reviwe : Metode Konstruksi Dan Perilaku Tiang granular Sebagai Perkuatan Tanah Dasar Timbunan*. Agregat, Vol. 6, No. 1.
- Iskandar, Fuziah Fitriani., Hamdhan, Inra Noer. (2016). *Pemodelan Numerik Pada Perbaikan Tanah Menggunakan Tiang granular Di Tanah Lempung Lunak Di Bawah Tanah Timbunan*. Jurusan Teknik Sipil Itehas, Vol. 2, No.1.
- IS 15284-1 (2003) : *Design and construction for ground improvement – Guidelines, Part I: Stone Columns (CED 43 : Soil and Foundation Engineering)*.
- Kamila, Bella Stella Nisa'ul., Isnaniati., & Farichah, Himatul. (2022). *Studi Parametrik Pengaruh Tiang granular Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak*. Agregat, Vol. 7, No. 1.
- R. D Barksdale & R. C. Bachus. 1983. *Design and Construction of Tiang granulars . Vol I*. 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.
- SNI 8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik.
- Yemima Yosica Nggebu, Jack H. Ticoh, Roski R.I Legrans. (2019). *Analisi Kestabilan Lereng Di Ruas Jalan Raya Manado-Tomohon Km 15*. TEKNO. Vol. 17, No. 71.