



Analisis Penurunan Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Variasi Kolom Pasir

Jesly H. Walukow^{#a}, Steeva G. Rondonuwu^{#b}, Agnes T. Mandagi^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^ajeslywalukow021@unsrat.student.ac.id, ^bsteeva_rondonuwu@unsrat.ac.id, ^cagnes.mandagi@unsrat.ac.id

Abstrak

Tanah lempung memiliki kapasitas dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas rendah sehingga proses konsolidasi berlangsung relatif lama. Kolom pasir digunakan sebagai media drainase untuk mempercepat proses konsolidasi. Penelitian ini bertujuan meninjau mekanisme kerja kolom pasir, mengetahui percepatan konsolidasi, serta membandingkan penurunan tanah sebelum dan sesudah menggunakan kolom pasir. Penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan uji konsolidasi (oedometer) dengan menempatkan kolom pasir pada sampel tanah dengan variasi tanpa kolom pasir 1, 2, dan 3 kolom pasir. Pembebanan diberikan bertahap sebesar 1, 2, 4, 8, 16, dan 32 kg. Parameter yang dianalisis meliputi indeks kompresi (C_c), penurunan konsolidasi (S_c), koefisien konsolidasi (C_v), waktu mencapai derajat konsolidasi 90% (t_{90}), dan derajat konsolidasi radial (U_r) berdasarkan teori Barron. Hasil menunjukkan bahwa tanah asli memiliki C_c 0,119 cm²/detik, S_c 0,232 cm, C_v 0,015 cm²/detik, dan t_{90} 3,610 menit. Pada 1, 2, dan 3 kolom pasir berturut-turut diperoleh C_c 0,212; 0,287; 0,333 cm²/detik, S_c 0,385; 0,529; 0,577 cm, C_v 0,022; 0,040; 0,028 cm²/detik, dan t_{90} 2,250; 1,210; 1,690 menit. Pada pembebanan 32 kg, t_{90} tanah asli sebesar 46,24 menit, sedangkan 1 dan 2 kolom masing-masing 9,00 dan 8,41 menit. Analisis Barron pada waktu 1440 menit menghasilkan U_r sekitar 67% untuk 1 kolom, 51% untuk 2 kolom, dan 90% untuk 3 kolom. Hasil ini menunjukkan bahwa kolom pasir mempercepat konsolidasi, dengan dua kolom memberikan respons terbaik berdasarkan C_v dan t_{90} , sedangkan tiga kolom memberikan derajat konsolidasi radial tertinggi.

Kata kunci: tanah lempung, kolom pasir, konsolidasi, oedometer, Barron

1. Pendahuluan

Tanah merupakan salah satu komponen penting dalam konstruksi karena berfungsi sebagai media pendukung beban struktur. Kinerja konstruksi sangat dipengaruhi oleh karakteristik tanah dasar, terutama pada tanah berbutir halus seperti lempung. Tanah lempung pada umumnya mempunyai permeabilitas rendah, kompresibilitas relatif tinggi, plastisitas tinggi, serta kecenderungan mengalami perubahan volume ketika menerima beban. Kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan tanah yang berlangsung dalam waktu lama dan berpotensi menimbulkan penurunan diferensial pada konstruksi.

Masalah konsolidasi pada tanah lempung tidak hanya berkaitan dengan besarnya penurunan akhir, tetapi juga dengan waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi tertentu. Ketika beban diberikan, sebagian tambahan tegangan pada awalnya dipikul oleh air pori. Selanjutnya tekanan air pori berlebih berkurang melalui proses keluarnya air dari pori sehingga tegangan efektif tanah meningkat dan butiran tanah menjadi lebih rapat. Karena permeabilitas lempung rendah, proses tersebut berlangsung relatif lambat.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mempercepat konsolidasi adalah kolom pasir. Kolom pasir berfungsi sebagai media drainase vertikal dengan permeabilitas lebih tinggi daripada tanah lempung di sekitarnya. Kehadiran kolom memungkinkan air pori bergerak secara horizontal atau radial menuju kolom, kemudian mengalir melalui material pasir. Dengan demikian, panjang lintasan drainase menjadi lebih pendek dibandingkan kondisi tanah asli yang dominan mengandalkan aliran vertikal.

Penelitian dalam skripsi ini dikembangkan dengan membandingkan empat kondisi benda uji, yaitu tanah asli, tanah dengan satu kolom pasir, dua kolom pasir, dan tiga kolom pasir. Selain parameter C_c , S_c , C_v , dan t_{90} , penelitian juga menggunakan teori Barron untuk menilai derajat konsolidasi radial. Pendekatan ini penting karena hasil oedometer merepresentasikan konsolidasi satu dimensi, sedangkan mekanisme kolom pasir berkaitan dengan aliran radial menuju drainase.

Berdasarkan rumusan masalah penelitian, kajian diarahkan pada tiga hal, yaitu mekanisme kerja kolom pasir, tingkat percepatan konsolidasi, dan perbandingan penurunan antara tanah asli dengan tanah yang diperbaiki. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai hubungan antara jumlah kolom pasir, jalur drainase, kecepatan konsolidasi, dan besarnya penurunan.

2. Landasan Teori

Konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume tanah jenuh akibat keluarnya air pori setelah tanah menerima beban. Pada tanah berbutir halus, proses ini berlangsung relatif lambat karena permeabilitasnya rendah. Saat pembebanan diberikan, sebagian tambahan tegangan mula-mula dipikul oleh air pori, kemudian secara bertahap air pori keluar sehingga tegangan efektif tanah meningkat dan struktur tanah menjadi lebih rapat yang menyebabkan penurunan. Analisis konsolidasi satu dimensi digunakan untuk menggambarkan hubungan antara penurunan, waktu, dan perubahan tegangan, sedangkan pada pengujian oedometer deformasi lateral benda uji dibatasi sehingga perubahan volume terutama terjadi secara vertikal. Indeks kompresi C_c menggambarkan kecenderungan perubahan angka pori akibat peningkatan tegangan efektif dan ditentukan dengan persamaan

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_2 - \log \sigma_1} \quad (1)$$

sedangkan penurunan konsolidasi primer (S_c) dihitung dengan persamaan:

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \left(\frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \right) \quad (2)$$

Kecepatan konsolidasi dinyatakan melalui koefisien konsolidasi (C_v), yang berdasarkan metode Taylor dihitung dengan persamaan:

$$C_v = \frac{T_v \cdot H^2}{t} \quad (3)$$

dengan $T_v = 0,848$ untuk derajat konsolidasi 90%, H_d merupakan panjang lintasan drainase, dan t_{90} merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%. Keberadaan kolom pasir mengubah kondisi drainase karena air pori dapat mengalir secara horizontal menuju kolom pasir sehingga terbentuk aliran radial dengan lintasan drainase yang lebih pendek.

Teori Barron digunakan untuk menjelaskan proses konsolidasi radial akibat keberadaan kolom pasir sebagai media drainase vertikal. Dalam penelitian ini, analisis konsolidasi radial dilakukan pada pembebanan 32 kg untuk memperoleh derajat konsolidasi radial (U_r) pada variasi satu, dua, dan tiga kolom pasir. Derajat konsolidasi radial (U_r) dihitung dengan persamaan:

$$U_r = 1 - \exp \left(- \frac{8Tr}{F(n)} \right) \quad (4)$$

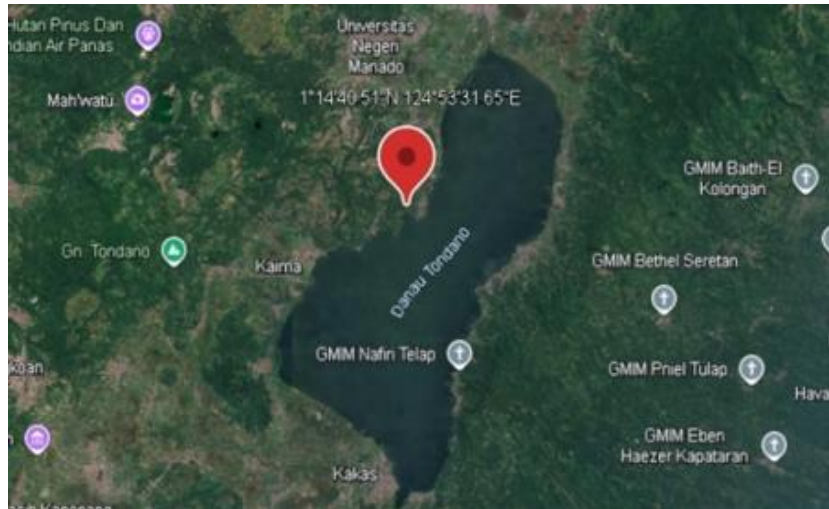
Nilai C_c , S_c , C_v , dan t_{90} digunakan untuk mengevaluasi karakteristik dan percepatan konsolidasi, sedangkan U_r digunakan untuk melengkapi penilaian efektivitas drainase radial akibat penggunaan kolom pasir.

3. Metode Penelitian

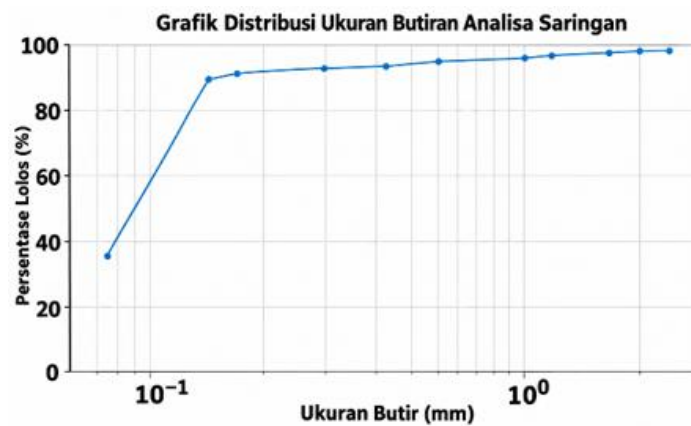
3.1 Material dan Lokasi Penelitian

Penelitian merupakan eksperimen laboratorium yang dilakukan untuk mengamati pengaruh pemasangan kolom pasir terhadap perilaku konsolidasi tanah lempung. Sampel tanah diambil dari daerah Danau Tondano dan pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas

Teknik Universitas Sam Ratulangi. Penelitian dilaksanakan pada Oktober 2025.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel di Danau Tondano



Gambar 2. Kurva Distribusi Ukuran Butiran Pasir yang digunakan sebagai Material Kolom

Material utama terdiri atas tanah lempung sebagai tanah yang diperbaiki dan pasir sebagai material kolom. Pasir yang digunakan berasal dari Desa Kema dan dipilih berdasarkan ukuran butiran yang lolos saringan No. 40 dan tertahan pada saringan No. 50, sehingga diperoleh material yang relatif seragam untuk pembuatan kolom.

3.2 Karakteristik Material

Pengujian pendahuluan meliputi kadar air, berat jenis, batas Atterberg, dan analisis ukuran butir. Hasil karakteristik tanah yang digunakan sebagai dasar pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Material

Parameter	Hasil
Kadar air	46,63%
Berat jenis (Gs)	1,96
Batas cair (LL)	74,106%
Batas plastis (PL)	38,889%
Indeks plastisitas (PI)	35,217%

3.3 Benda Uji dan Pengujian Konsolidasi

Empat kondisi benda uji digunakan, yaitu tanah asli tanpa kolom pasir, tanah dengan satu kolom pasir, tanah dengan dua kolom pasir, dan tanah dengan tiga kolom pasir. Masing-masing benda uji diuji menggunakan oedometer. Beban diberikan bertahap sebesar 1, 2, 4, 8, 16, dan 32 kg. Selama pembebanan, perubahan deformasi dicatat terhadap waktu.

Data deformasi digunakan untuk menentukan hubungan penurunan terhadap waktu dan memperoleh parameter konsolidasi. Analisis dilakukan melalui interpretasi kurva e - $\log \sigma$ untuk C_c , kurva konsolidasi untuk C_v dan t_{90} , serta perhitungan penurunan konsolidasi S_c . Percepatan konsolidasi dibandingkan berdasarkan perubahan t_{90} terhadap kondisi tanah asli.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakteristik Tanah

Nilai kadar air 46,63% menunjukkan bahwa tanah memiliki kandungan air yang cukup tinggi. Nilai LL sebesar 74,106% dan PI sebesar 35,217% menunjukkan plastisitas yang tinggi. Karakteristik tersebut mendukung kecenderungan tanah mengalami perubahan volume ketika menerima beban. Dengan permeabilitas yang rendah, air pori membutuhkan waktu lebih lama untuk keluar sehingga konsolidasi berlangsung bertahap.

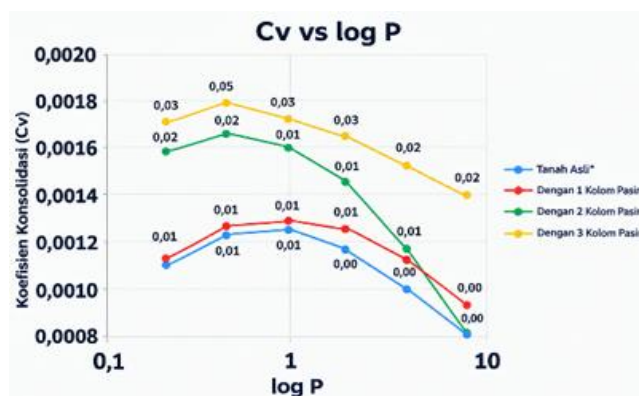
Hasil karakteristik tanah menjadi dasar bahwa penggunaan jalur drainase tambahan diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pengeluaran air pori. Kolom pasir kemudian digunakan sebagai media drainase dengan permeabilitas lebih tinggi daripada tanah lempung.

4.2. Parameter Konsolidasi

Grafik ini menunjukkan perubahan kemampuan tanah mengalami kompresi setelah diberi kolom pasir.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Indeks Kompresi (C_c)



Gambar 4. Grafik Perbandingan Koefisien Konsolidasi (C_v)

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai Compression Index (C_c) meningkat seiring bertambahnya jumlah kolom pasir. Nilai C_c tertinggi diperoleh pada variasi tiga kolom pasir sebesar 0,333, sedangkan nilai terendah terdapat pada tanah tanpa kolom pasir sebesar 0,119. Peningkatan ini menunjukkan bahwa tanah mengalami proses konsolidasi yang lebih efektif akibat terbentuknya jalur drainase tambahan.

Berdasarkan Gambar 4, nilai koefisien konsolidasi meningkat pada seluruh sampel yang menggunakan kolom pasir. Nilai tertinggi diperoleh pada variasi dua kolom pasir sebesar 0,040

cm²/detik, yang menunjukkan laju konsolidasi paling cepat dibandingkan variasi lainnya. Parameter hasil interpretasi pengujian konsolidasi untuk seluruh variasi dirangkum pada Tabel 2.

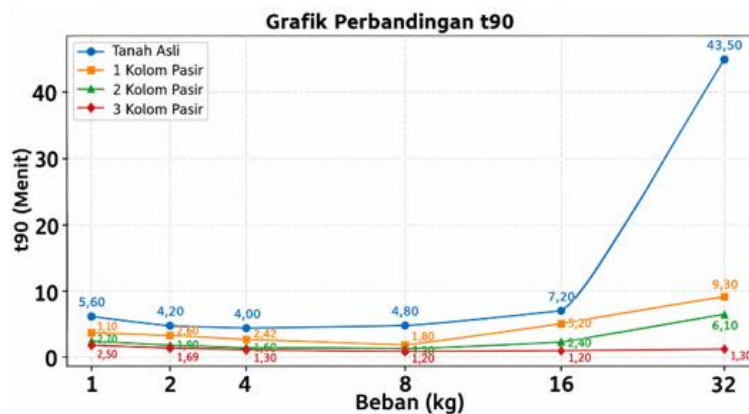
Tabel 2. Hasil Pengujian Karakteristik Tanah

Variasi	C _e	S _c (cm)	C _v (cm ² /det)	t ₉₀ (menit)
Tanah asli	0,119	0,232	0,015	3,610
1 kolom pasir	0,212	0,385	0,022	2,250
2 kolom pasir	0,287	0,529	0,040	1,210
3 kolom pasir	0,333	0,577	0,028	1,690

Nilai C_e meningkat dari 0,119 cm²/detik pada tanah asli menjadi 0,212, 0,287, dan 0,333 cm²/detik pada variasi satu, dua, dan tiga kolom pasir. Perubahan ini menunjukkan bahwa respons kompresibilitas benda uji berubah setelah pemasangan kolom pasir. Namun, C_e tidak digunakan sebagai satu-satunya indikator percepatan karena parameter tersebut lebih menggambarkan kecenderungan perubahan volume akibat perubahan tegangan.

Nilai S_c meningkat dari 0,232 cm pada tanah asli menjadi 0,385 cm pada satu kolom, 0,529 cm pada dua kolom, dan 0,577 cm pada tiga kolom. Peningkatan penurunan menunjukkan bahwa selama proses pengujian terjadi perubahan volume yang lebih besar pada benda uji dengan kolom pasir. Kondisi tersebut perlu dipahami bersama parameter waktu, karena penurunan yang lebih besar tidak secara otomatis berarti proses berlangsung lebih lambat.

Parameter yang paling jelas menunjukkan percepatan adalah C_v dan t₉₀. Nilai C_v tanah asli sebesar 0,015 cm²/detik meningkat menjadi 0,022 cm²/detik pada satu kolom dan 0,040 cm²/detik pada dua kolom. Pada tiga kolom, C_v sebesar 0,028 cm²/detik. Dengan demikian, dua kolom memberikan nilai C_v tertinggi di antara seluruh variasi.



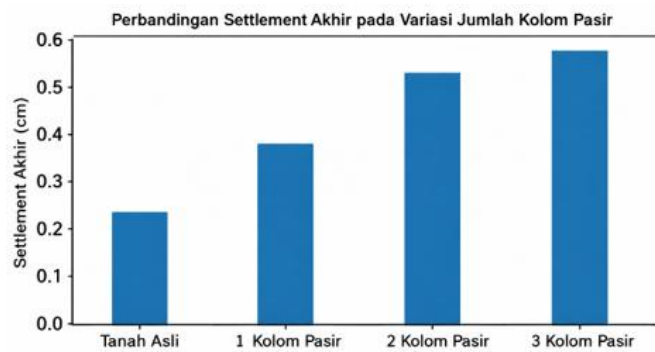
Gambar 5. Grafik Perbandingan t₉₀ pada Variasi Jumlah Kolom Pasir.

Nilai t₉₀ juga menunjukkan kecenderungan percepatan. Tanah asli memiliki t₉₀ sebesar 3,610 menit, sedangkan satu, dua, dan tiga kolom masing-masing 2,250, 1,210, dan 1,690 menit. Berdasarkan parameter tersebut, dua kolom menghasilkan waktu konsolidasi terpendek.

4.3 Penurunan Konsolidasi

Tabel 3. Hasil Penurunan Konsolidasi

Variasi	S _c (cm)	Kenaikan terhadap tanah asli
Tanah asli	0,232	—
1 kolom pasir	0,385	65,8%
2 kolom pasir	0,529	128,1%
3 kolom pasir	0,577	148,7%



Gambar 6. Perbandingan Settlement akibat Variasi Jumlah Kolom Pasir

Penurunan konsolidasi terbesar diperoleh pada tiga kolom pasir, yaitu 0,577 cm, sedangkan tanah asli menghasilkan 0,232 cm. Penambahan kolom pasir memberikan ruang bagi air pori untuk bergerak menuju media drainase yang lebih permeabel sehingga perubahan volume selama konsolidasi dapat berkembang lebih efektif.

Dari sudut pandang perbaikan tanah, nilai penurunan harus dibaca bersama waktu konsolidasi. Penurunan yang lebih besar dalam waktu yang lebih singkat dapat menunjukkan bahwa proses pelepasan air pori berlangsung lebih aktif. Oleh karena itu, S_c dan t_{90} digunakan secara bersamaan untuk menggambarkan respons konsolidasi.

4.4 Mekanisme Percepatan Konsolidasi

Pada tanah asli, aliran air pori selama konsolidasi terutama berlangsung melalui lintasan vertikal sehingga panjang jalur drainase relatif besar. Ketika kolom pasir dipasang, air pori dari tanah di sekitar kolom dapat bergerak menuju kolom melalui arah radial. Pasir yang memiliki permeabilitas lebih tinggi kemudian menyediakan jalur keluarnya air pori.

Perubahan mekanisme aliran tersebut menjelaskan mengapa nilai C_v meningkat dan t_{90} menurun pada sebagian besar variasi. Kolom pasir tidak hanya berfungsi sebagai material pengisi, tetapi terutama sebagai media drainase. Dengan semakin tersedianya jalur drainase, tekanan air pori dapat berkurang dan tegangan efektif tanah meningkat lebih cepat.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pengaruh jumlah kolom tidak sepenuhnya linier pada seluruh parameter. Dua kolom menghasilkan C_v tertinggi dan t_{90} terendah, sedangkan tiga kolom memberikan nilai C_c dan S_c terbesar serta respons radial Barron tertinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa interpretasi efektivitas kolom pasir perlu mempertimbangkan parameter vertikal dan radial secara bersamaan.

4.5 Analisis Konsolidasi Radial berdasarkan Barron

Analisis Barron diterapkan pada data pembebanan 32 kg. Analisis ini digunakan untuk melihat perkembangan derajat konsolidasi radial akibat adanya kolom pasir. Berbeda dengan pengujian oedometer yang merepresentasikan konsolidasi satu dimensi, analisis radial menggambarkan pengaruh jalur drainase menuju kolom.

Pada satu kolom pasir, derajat konsolidasi radial meningkat seiring bertambahnya waktu dan mencapai sekitar 67% pada akhir pengamatan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian proses konsolidasi radial telah berlangsung, tetapi kondisi konsolidasi radial belum mencapai 100%. Keberadaan kolom tetap memberikan jalur drainase tambahan dibandingkan kondisi tanpa kolom.

Pada dua kolom pasir, derajat konsolidasi radial pada akhir pengamatan mencapai sekitar 51%. Nilai ini lebih rendah daripada satu kolom pada hasil analisis Barron, meskipun hasil uji oedometer menunjukkan dua kolom memiliki C_v tertinggi dan t_{90} terendah. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa respons teoritis radial dan parameter konsolidasi satu dimensi tidak selalu menghasilkan urutan kinerja yang sama.

Pada tiga kolom pasir, derajat konsolidasi radial meningkat paling tinggi dan mencapai sekitar 90% pada waktu pengamatan 1440 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa pada analisis radial, tiga kolom menyediakan kondisi drainase yang paling efektif di antara variasi yang diuji.



Gambar 7. Perbandingan Derajat Konsolidasi Radial Barron

Tabel 4. Hasil Analisis Konsolidasi Radial Berdasarkan Barron

Variasi	Beban	Waktu (menit)	U_r
1 kolom pasir	32 kg	1440	67%
2 kolom pasir	32 kg	1440	51%
3 kolom pasir	32 kg	1440	90%

4.6 Pembahasan Umum

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemasangan kolom pasir memengaruhi perilaku konsolidasi tanah lempung. Dibandingkan tanah asli, benda uji dengan kolom pasir menunjukkan waktu konsolidasi yang lebih singkat dan koefisien konsolidasi yang lebih tinggi. Pada pembebanan 32 kg, penurunan t_{90} mencapai sekitar 80,54% untuk satu kolom dan 81,81% untuk dua kolom.

Efektivitas dua kolom berdasarkan C_v dan t_{90} menunjukkan bahwa jumlah kolom optimum tidak selalu sama jika indikator yang digunakan berbeda. Penambahan kolom dari dua menjadi tiga tidak meningkatkan C_v , tetapi analisis Barron justru menunjukkan U_r tertinggi pada tiga kolom. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan perbedaan pendekatan: C_v dan t_{90} diperoleh dari respons konsolidasi oedometer, sedangkan U_r menggambarkan komponen konsolidasi radial secara teoritis.

Temuan tersebut penting dalam menilai penggunaan kolom pasir. Jumlah kolom sebaiknya tidak ditentukan hanya berdasarkan prinsip semakin banyak semakin baik, tetapi perlu mempertimbangkan parameter desain, pola drainase, jarak antar kolom, dan target derajat konsolidasi. Dalam konteks penelitian ini, dua kolom memberikan respons paling baik berdasarkan laju konsolidasi hasil oedometer, sementara tiga kolom paling efektif berdasarkan derajat konsolidasi radial Barron.

Temuan utama penelitian dapat dirangkum sebagai berikut: (1) kolom pasir menyediakan jalur drainase dengan permeabilitas lebih tinggi; (2) keberadaan jalur tersebut mempercepat disipasi tekanan air pori dan mempercepat konsolidasi; (3) dua kolom memberikan respons tercepat berdasarkan C_v dan t_{90} hasil oedometer; dan (4) tiga kolom menunjukkan perkembangan konsolidasi radial tertinggi berdasarkan analisis Barron. Ringkasan tersebut menjadi dasar untuk menarik kesimpulan penelitian tanpa mengabaikan perbedaan antara pengamatan eksperimen dan pendekatan teoritis.

Dari sisi waktu, dua kolom memberikan hasil paling menonjol dengan C_v sebesar 0,040 cm^2/detik dan t_{90} sebesar 1,210 menit. Pada beban 32 kg, t_{90} turun dari 46,24 menit pada tanah asli menjadi 8,41 menit pada dua kolom. Dari sisi analisis radial, tiga kolom menghasilkan U_r sekitar 90% pada 1440 menit. Oleh sebab itu, kesimpulan mengenai jumlah kolom yang paling efektif harus disesuaikan dengan indikator yang dipakai.

Secara keseluruhan, penelitian menunjukkan bahwa kolom pasir memengaruhi tiga aspek utama konsolidasi, yaitu perubahan karakteristik kompresibilitas, besarnya penurunan, dan kecepatan proses konsolidasi. Nilai C_c dan S_c meningkat pada penambahan kolom, sedangkan C_v meningkat hingga dua kolom dan kemudian menurun pada tiga kolom. Pola tersebut memperlihatkan bahwa respons tanah terhadap kolom pasir merupakan hasil interaksi antara perubahan deformasi dan kondisi drainase.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, dapat kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemasangan kolom pasir terbukti dapat mempercepat proses konsolidasi pada tanah lempung. Hal ini terjadi karena kolom pasir memiliki permeabilitas yang lebih tinggi sebagai saluran drainase dibandingkan tanah di sekitarnya. Membutuhkan waktu yang lebih lama untuk keluar karena aliran air pori pada tanah asli hanya bergerak secara vertikal. Aliran air pori akan bergerak menuju kolom pasir secara radial setelah kolom pasir dipasang. Tekanan air pori terdisipasi lebih cepat karena perubahan mekanisme aliran ini, dan konsolidasi terjadi lebih cepat.
2. Penggunaan kolom pasir memberikan tingkat percepatan konsolidasi yang cukup signifikan. Berdasarkan hasil pengujian, waktu yang dibutuhkan tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90% (t_{90}) menjadi lebih singkat dibandingkan tanah asli. Persentase percepatan yang diperoleh masing-masing sebesar 45,37% pada beban 1 kg, 37,67% pada beban 4 kg, 72,56% pada beban 8 kg, dan 80,54% pada beban 32 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan, semakin efektif kolom pasir dalam mempercepat proses konsolidasi..
3. Berdasarkan hasil pengujian konsolidasi, tanah lempung yang telah diperbaiki dengan kolom pasir menunjukkan penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang tidak mengalami perbaikan. Nilai penurunan tanah meningkat dari 0,2319 cm untuk tanah asli menjadi 0,3846 cm, 0,5290 cm, dan 0,5768 cm untuk variasi kolom pasir 1, 2, dan 3 secara berurutan. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan kolom pasir memperbaiki efektivitas proses konsolidasi, sehingga semakin banyak kolom pasir yang ditambahkan, semakin besar penurunan yang terjadi pada tanah.

Referensi

- Anto Budi Listyawan, Qunik Wiqoyah, Rena Ningsih, Marten Widhi Satriyana. (2015). Pengaruh Kolom Pasir terhadap Konsolidasi Tanah Lempung Lunak. *Eco Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 11, No. 1, Maret 2015. ("Sand Column can improve the soft clay soil in terms of consolidation... coefficient of consolidation increases... settlement reduced significantly.")
- Bergado, D. T., Chai, J. C., Miura, N., & Balasubramaniam, A. S. (1996). *Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft ground improvement*. Rotterdam: Balkema.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, Vol. 3, pp. 677–682.
- Iman Hosseinpour, Mario RiCcio, Marcio S.S. Almeida. (2021). Strength and consolidation characteristics of clay with geotextile-encased sand column. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement*, 174(2), pp. 63–69. ("Installing sand columns in clays ... reduced compression index ... and affected consolidation behavior.")
- Iswan, & Carissa. (2024). Pengaruh pasir sebagai drainase terhadap parameter konsolidasi tanah lempung. *Magister Thesis, Universitas Brawijaya*. ("VARIATION with geosynthetic encased sand gran-ular columns tested in soft clay to observe consolidation rate aCceleration.")
- Mir, B. A., et al. (2012). Consolidation Behavior of Composite Ground Reinforced with Sand Columns. (eksperimental & PDF ringkasan).
- Rusdi Saputra. (2023). Pengaruh Inklusi Geosynthetic Encased Sand Granular Column (GESGC) pada Tanah Lempung Lunak terhadap Laju Konsolidasi.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in*
- Yin, J. H., & Cheng, X. (2018). Modeling of clay–sand mixtures and their intergranular structure effect on consolidation behavior. *Geotechnical Research*, 5(2), 85–98.