

DRAINASE VERTIKAL DENGAN KOLOM CAMPURAN PASIR-PECAHAN BETON UNTUK MEMPERCEPAT KONSOLIDASI TANAH LEMPUNG

Anto Budi Listyawan¹⁾, Qunik Wiqoyah²⁾, Sugiyatno³⁾ & M. Alaydrus Guntur Pamungkas⁴⁾

^{1,2,3,4)} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A Yani Tromol Pos I Pabelan, Surakarta

Email korespondensi : Anto.Budi@ums.ac.id

ABSTRAK

Tanah di Desa Troketon, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten mempunyai nilai PI sebesar 34,59%; LL 62,55%; PL 27,96%; dan SL 19.62% ditinjau dengan metode USCS (*United Soil Classification System*) termasuk ke dalam kelompok golongan CH yaitu lempung anorganik berplastisitas tinggi. Tanah lempung yang buruk dapat mengakibatkan rusaknya bangunan di atasnya seperti jalan yang bergelombang. Tanah lempung yang buruk dapat diperbaiki menggunakan drainase vertikal yang bertujuan untuk mempercepat penurunan sehingga waktu yang dihabiskan untuk pembangunan relatif singkat dan tidak memakan biaya yang berlebihan. Pada penelitian drainase vertikal ini digunakan kolom campuran pasir dan pecahan beton dengan variasi susunan kolom pola bujur sangkar dan segitiga. Sampel diambil pada titik tengah antar 4 kolom, 3 kolom dan 2 kolom, kemudian dilakukan pengujian konsolidasi. Pada variasi bujur sangkar titik tengah antar 4 kolom didapatkan nilai C_v sebesar 0,000187 cm^2/s , C_c sebesar 0.429 dan S_c sebesar 0.173 sedangkan, titik tengah antar 2 kolom mempunyai C_v sebesar 0,000163 cm^2/s , C_c sebesar 0.490 dan S_c sebesar 0.176. Pada variasi segitiga titik tengah antar 3 kolom didapatkan nilai C_v sebesar 0.000129 cm^2/s , C_c sebesar 0.541 dan S_c sebesar 0.254 sedangkan, titik tengah antar 2 kolom mempunyai nilai C_v sebesar 0.000114 cm^2/s , C_c sebesar 0.561 dan S_c sebesar 0.258. Sehingga kolom campuran pasir dan pecahan beton dengan variasi bujur sangkar lebih baik untuk digunakan sebagai drainase vertikal.

Kata kunci : konsolidasi, pasir, pecahan beton, pola bujur sangkar, pola segitiga

ABSTRACT

Clay soil in Troketon Village, Pedan District, Klaten Regency has a PI 34.59%; LL 62.55%; PL 27.96%; and SL 19.62%. It classifies as CH (high plasticity anorganic soil). It classifies as poor soil for subgrade that confirmed by weaving in some pavements of road. To improve the high plasticity clay a method of vertical drained can be applied. Traditionally, sand column has been widely installed as a material of vertical drained in some sites. The recent research tried to combine sand and concrete waste as vertical drainage material. Sand-Concrete waste columns are placed in a clay soil in square and triangular pattern. Surcharge load are given above the saturated clay and the water is flow out from the void and drained by the column into horizontal channel. Soil samples are taken from midpoint of 4, 3, and 2 columns and tested into oedometer to measure the consolidation parameters. The result shows in the mid-square rectangular variation between 4 columns, the C_v is 0.000187 cm^2 / s , C_c is 0.429 and S_c is 0.173 cm; while, the midpoint between the 2 columns has a C_v of 0.000163 cm^2 / s , C_c is 0.490 and S_c is equal to 0.176 cm. In the midpoint variation between the 3 columns, the C_v is 0.000129 cm^2 / s , C_c is 0.541 and S_c is 0.254 cm; while the midpoint between the 2 columns has a C_v value of 0.000114 cm^2 / s , C_c is 0.561 and S_c is 0.258 cm. The sand-concrete waste columns with rectangular variations are more effective to accelerate the consolidation of clay soil.

Kata kunci : konsolidasi, pasir, pecahan beton, pola bujur sangkar, pola segitiga

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung adalah tanah dengan ukuran butiran kurang dari 0,075 mm. Tanah lempung mempunyai kandungan mineral yaitu terdapat kira-kira 15 macam mineral yang diklasifikasikan sebagai mineral lempung. Di antaranya terdiri dari kelompok-kelompok: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, dan *polygorskite* (Hardiyatmo, 2002). Merdhiyanto (2015) telah melakukan uji fisis tanah lempung di Desa Troketon, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten, dimana tanah tersebut memiliki Indeks Plastisitas (PI) sebesar 34,59%; Batas Cair (LL) 62,55%, Batas Plastis (PL) 27,96%; dan Batas Susut (SL) 19.62%. Ditinjau dengan metode USCS (*United Soil Clasification System*) tanah tersebut termasuk ke dalam kelompok golongan CH yaitu lempung anorganik berplastisitas tinggi. Tanah lempung dengan plastisitas tinggi memiliki sifat yang buruk seperti rendahnya kuat geser, volume mengembang dengan cepat dalam kondisi basah, dan laju konsolidasi yang rendah sehingga dapat menyebabkan bangunan di atasnya mengalami kerusakan; seperti jalan berlubang dan retaknya dinding akibat turunnya permukaan tanah (Listyawan, dkk, 2020).

Perbaikan tanah perlu dilakukan untuk mengatasi sifat-sifat buruk tanah lempung dengan plastisitas tinggi. Salah satu metode perbaikan tanah yang sering digunakan adalah memasang drainase vertikal secara merata di lapisan tanah lempung dengan tujuan menyediakan saluran untuk air yang keluar dari pori-pori tanah lempung yang nantinya akan diteruskan ke saluran drainase horizontal di atas muka tanah pada lokasi yang akan dibangun struktur gedung, jalan, atau bangunan lainnya (Malikhi, dkk, 2016). Cara tradisional yang telah banyak dipraktikkan adalah dengan memasang kolom-kolom yang diisi pasir sebagai drainase vertikal. Beberapa peneliti telah mencoba mengganti material pasir sebagai pengisi kolom drainase vertikal menggunakan bahan lainnya.

Dani (2018) melakukan penelitian tentang konsolidasi tanah lempung lunak dengan drainase vertikal berupa kolom pecahan limbah beton dua dimensi dengan diameter 10 cm, 15 cm, 20 cm, dengan variasi pengambilan sampel 16,68 cm, 33,34 cm, dan 50 cm. Variasi diameter 20 cm lebih efektif daripada yang 10 cm dan 15 cm dengan nilai C_v 93,628%, C_c 58,115%, dan S_c 49,731%. Penelitian yang dilakukan oleh Rini (2015) tentang penggunaan kolom drainase vertikal bahan campuran pasir dan kapur dua dimensi menghasilkan nilai C_v mengalami peningkatan dengan persentase sebesar 644,184%. Nilai indeks pemampatan (C_c) mengalami penurunan yang sebesar 61,216%. Nilai penurunan konsolidasi (S_c) juga mengalami penurunan sebesar 63,781%. Penelitian yang dilakukan oleh Erlambang (2018) dengan judul "Analisis Konsolidasi dan Penurunan Tanah Lempung dengan Kolom Serbuk Bata Merah sebagai Drainase Vertikal" menggunakan diameter kolom 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Kolom dengan diameter 20 cm paling baik digunakan untuk drainase vertikal dengan nilai C_v sebesar 73,848%; nilai C_c sebesar 22,730%; dan nilai S_c sebesar 51,633%.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan material campuran pasir-pecahan limbah beton sebagai bahan kolom drainase vertikal terhadap konsolidasi tanah lempung lunak dengan variasi susunan bujur sangkar dan segitiga. mempercepat proses konsolidasi. Pecahan limbah beton digunakan karena memiliki pori-pori antar butiran yang besar sehingga diharapkan akan membantu mempercepat proses mengalirnya air menuju ke drainase horizontal di permukaan lapisan tanah lempung.

1.1 Konsolidasi

Konsolidasi tanah adalah proses mengecilkan volume secara berkelanjutan pada tanah jenuh sempurna dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori (Indrarnatna & Walker, 2020). Pengujian konsolidasi dilakukan di laboratorium menggunakan alat konsolidometer. Tujuan pengujian konsolidasi adalah untuk menentukan sifat dari:

Indeks pemampatan tanah (*Compression Indeks, C_c*) dihitung dengan persamaan :

$$C_c = \frac{e_2 - e_1}{\log \frac{p_2}{p_1}} \quad (1)$$

dengan :

- C_c = Indeks pemampatan tanah (*Compression Index*)
- e₁ = Angka pori saat tekanan p₁
- e₂ = Angka pori saat tekanan p₂
- p₁ = Tekanan efektif saat tanah *compressible* awal, kg/cm²
- p₂ = Tekanan efektif saat tanah *compressible* akhir, kg/cm²

Koefisien konsolidasi tanah (*Coefficient of Consolidation, C_v*) dihitung dengan persamaan :

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t_{90}} \quad (2)$$

dengan :

- C_v = Koefisien konsolidasi, cm²/dt
- T_v = *Time factor* (bilangan tak berdimensi)
- H = Tebal tanah, cm
- t₉₀ = Waktu konsolidasi, detik

Penurunan konsolidasi tanah (S_c) dihitung dengan persamaan :

$$S_c = H \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (3)$$

dengan :

- S_c = Penurunan konsolidasi, cm
- H = Tebal tanah, cm
- e₀ = Angka pori pada awal pengujian
- e₁ = Angka pori pada akhir pengujian

1.2 Drainase vertikal

Perbaikan tanah lunak yang tebal dapat dilakukan dengan melakukan percepatan konsolidasi, hal ini dapat dicapai dengan penggunaan vertical drain atau drainase tegak setebal lapisan lunak dengan maksud agar mempercepat pengeluaran air pori dan stabilitas dari tanah tersebut lebih cepat tercapai (Gratchev, dkk, 2012). Tipe drainase vertikal bergantung pada material yang digunakan dan dibagi menjadi dua bagian besar (Kindangen, dkk, 2019), yaitu sebagai berikut.

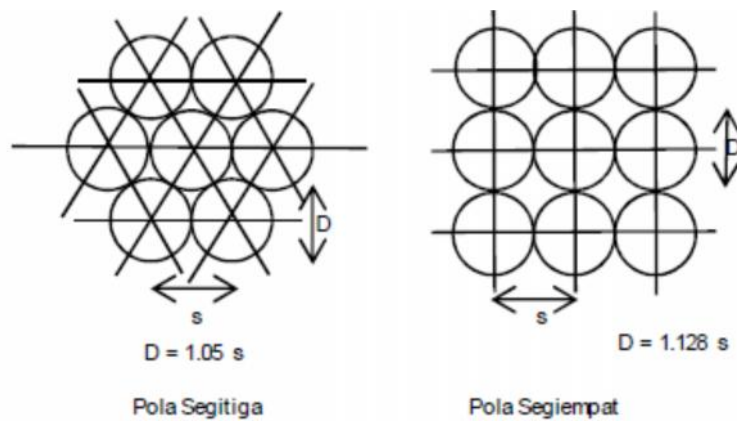
Drainase vertikal konvensional

Tipe ini klasik yang sudah banyak digunakan. Bahan yang digunakan adalah bahan bergradasi atau pasir (*sand drain*). Umumnya terdiri dari pasir atau kerikil yang mempunyai permeabilitas tinggi. Metode tradisional dalam membuat drainase vertikal adalah dengan membuat lubang bor pada lapisan lempung dan mengurung kembali dengan pasir yang bergradasi sesuai diameternya sekitar 200 – 400 mm dan saluran drainasi tersebut dibuat sedalam lebih dari 30 m. Pasir harus dapat dialiri air secara efisien tanpa membawa partikel-partikel tanah yang halus. Drainase cetakan juga banyak digunakan dan biasanya lebih murah daripada drainasi urugan untuk suatu daerah tertentu.

Drainase vertikal sintesis

Ada beberapa macam dari vertikal drain sintetik dan dapat dikategorikan dalam beberapa kategori bahan (Magnan, 1983), drainase vertikal sintesis dari bahan: karton; plastik; pasir yang dibungkus dengan material sintetik; serabut kelapa. Drainase vertikal sintetik umumnya berbentuk strip dan terdiri dari dua komponen utama yaitu inti plastik yang dibungkus dengan material geosintesis. Inti plastik berfungsi sebagai penyalur air dan pembungkus sebagai filter bagi partikel tanah halus.

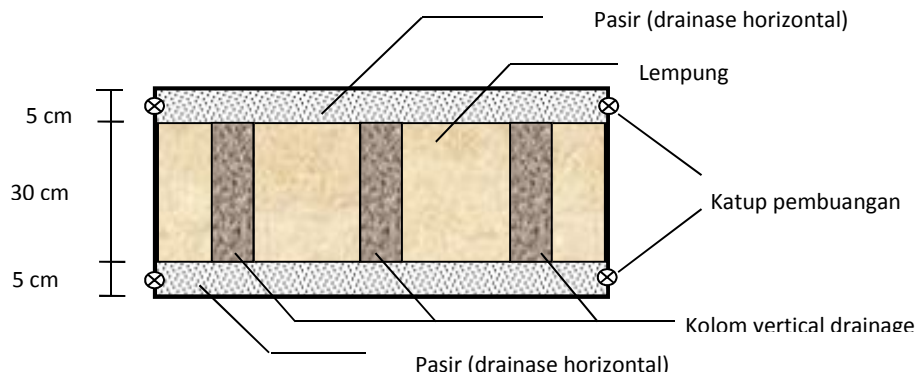
Pola susunan drainase vertikal biasanya berupa bujur sangkar dan segitiga, seperti terlihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Pola susunan drainase vertikal (Aspar & Fitriani, 2016)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan bahan utama yang tanah lempung dengan kondisi terganggu (*disturbed*) dengan kedalaman pengambilan tanah ± 40 cm. Tanah lempung berasal dari Desa Troketon, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten. Selain tanah lempung, bahan yang digunakan sebagai drainase horisontal adalah pasir yang berasal dari lereng gunung Merapi yang telah disaring dan lolos saringan No.4. Pada drainase vertikal bahan yang digunakan adalah campuran pasir dan pecahan beton; pecahan beton telah tertahan saringan No.4 yang berasal dari limbah uji kuat tekan silinder beton. Model lapisan tanah lempung dan kolom drainase vertikal bias dilihat di **Gambar 2**.



Gambar 2. Potongan melintang skema box uji.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahap pertama, dengan melakukan penentuan lokasi dan pengambilan contoh tanah sesuai studi literature yang telah ada. Kemudian mempersiapkan alat-alat dan bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian.

Tahap ke dua (Gambar 3) dilakukan dengan menyiapkan lapisan tanah lempung di dalam box pengujian. Pasir setebal 5 cm dihamparkan pada dasar box pengujian sebagai drainase horisontal. Kemudian memasukan tanah lempung hingga ketinggian tanah mencapai 30 cm yang dipadatkan secara bertahap 3 lapis dengan secara merata. Setelah itu tanah dijenuhkan dengan merendam air selama 4 hari. Setelah direndam selama 4 hari air dibuang dengan membuka pintu pembuangan dan tunggu selama 24 jam.



Gambar 3. Tanah lempung dimasukkan dalam box dan dipadatkan merata.

Tahap ke tiga (Gambar 4 dan Gambar 5) dilakukan dengan membuat lubang-lubang, dan mengisinya dengan campuran pasir-pecahan limbah beton sesuai susunan pola bujur sangkar atau segitiga. Kemudian pasir setebal 5 cm dihamparkan di atasnya muka tanah sebagai drainase horisontal. Selanjutnya memasang *plywood* diatas tanah sampel, lalu dibebani di atas *plywood* dengan berat 180 kg sebagai beban timbunan dan didiamkan selama 4 hari dengan membuka kran air di bagian atas dan bawah box tepat pada lapisan pasir, sehingga air akan keluar secara perlahan.

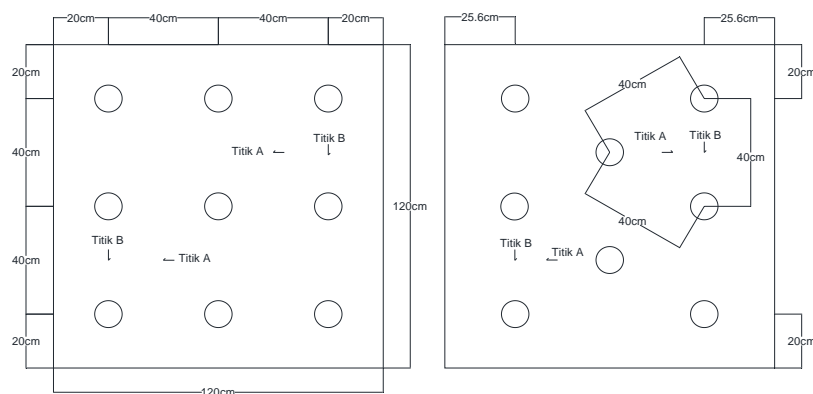


Gambar 4. Tanah lempung dijenuhkan dan disiapkan lubang kolom pasir-pecahan limbah beton.



Gambar 5. Pre loading untuk mengeluarkan air dari pori-pori tanah lempung.

Tahap ke empat (**Gambar 6**) dilakukan dengan mengambil sampel tanah di titik-titik yang telah ditentukan, yaitu di tengah-tengah antar 4 kolom, 3 kolom, dan 2 kolom. Kemudian semua sampel tanah yang telah diambil dicetak dan dilakukan pengujian konsolidasi dengan alat oedometer. Parameter-parameter konsolidasi tanah didapatkan dari analisis data hasil pengujian, yaitu C_v , C_c , dan S_c .



Gambar 6. Titik-titik pengambilan sampel benda uji konsolidasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil uji fisis tanah lempung

Hasil uji berat jenis tanah lempung adalah 2,78 yang memenuhi kategori sebagai tanah lempung (Hardiyatmo, 2002). Batas-batas Atterberg tanah lempung Desa Troketon bias dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Uji Batas-Batas *Atteberg*

LL%	PL%	PI%	SL%
62.55	27.96	34.59	19.62

Dari **Tabel 2**, terlihat nilai Indeks Plastisitas 19,62% sehingga termasuk lempung plastisitas tinggi (Hardiyatmo, 2002).

Hasil pengujian hasil analisa saringan tanah lempung bias dilihat pada **Tabel 3**. Dari **Tabel 2** dan **Tabel 3**, menurut USCS (*Unified Soil Classification System*), tanah lolos saringan No.200 sebesar 61%, karena persen lolos saringan No.200 lebih dari 50% maka tergolong dalam tanah berbutir halus. Dari perhitungan LL (batas cair) diperoleh 62,55% dan lebih dari 50% maka tergolong lanau lempung dengan kategori MH (lanau anorganik plastisitas tinggi), CH (lempung anorganik plastisitas tinggi), dan OH (lempung organik plastisitas tinggi). Berdasarkan grafik plastisitas hubungan LL dan PL diperoleh kesimpulan bahwa tanah tergolong CH atau lempung anorganik plastisitas tinggi.

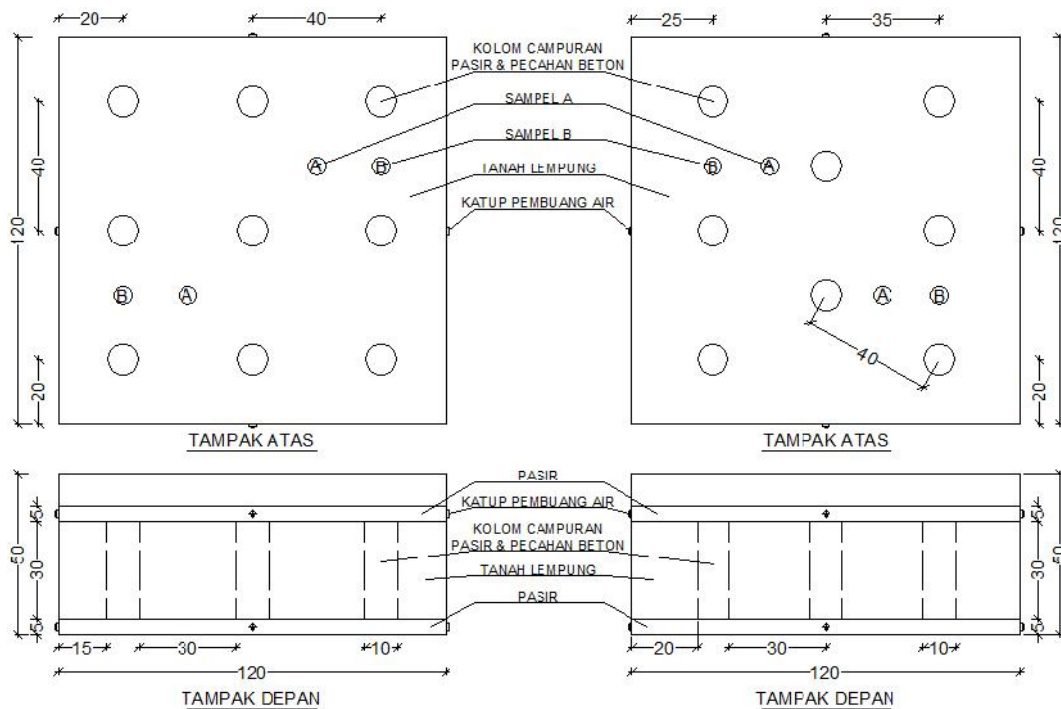
Klasifikasi tanah menurut AASHTO (*American Association Of State Highway And Transportation Officials*) pada analisa saringan didapatkan persen lolos saringan N0.200 yaitu sebesar 61% dan lebih ari 35% maka tanah termasuk dalam golongan A-5, A-6, A-6, dan A-7. Didapatkan LL (batas cair) 62,55% maka tanah tergolong A-5 dann A-7. PI (indeks plastisitas) sebesar 34,59% tergolong dalam A-6 dan A-7, dari niai persen lolos saringan No.200, LL dan PI dapat didapatkan nilai GI (indeks kelompok) sebesar 19,44% sehingga masuk kedalam golongan A-7. PI lebih besar dari (LL-30) maka tanah diklasifikasikan dalam A-7-6 yaitu tanah berlempung buruk unyuk perkerasan jalan (Listyawan, dkk, 2020).

Tabel 3. Hasil Uji Analisa Saringan

Nomor	Berat	Berat	Persentase	
Saringan	Tertahan (gr)	Tertahan (gr)	Tertahan %	Lolos %
3/4	0	0	0	100
3/8	0	0	0	100
4	0	0	0	100
8	0	0	0	100
16	7	7	7	93
30	8	15	15	85
50	8	23	23	77
100	7	30	30	70
200	9	39	39	61
pan	61	100	100	0
	100			

3.2 Hasil uji konsolidasi

Uji konsolidasi dilakukan pada sampel tanah yang diambil dari box uji yang bertujuan untuk mendapatkan nilai koefisien konsolidasi (Cv), indeks pemampatan (Cc), dan penurunan konsolidasi (Sc) tanah lempung dari Desa Troketon, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten. Untuk mengetahui perbandingan tanah lempung yang terdrainase vertikal pada variasi susunan kolom bujur sangkar dan segitiga dengan campuran pasir dan pecahan beton sebagai kolom. Jumlah sampel yang diambil adalah 4 buah setiap variasi susunan pola yaitu 2 titik A (titik tengah antara 4 kolom pada bujur sangkar / 3 kolom pada segitiga) dan 2 titik B (titik tengah antara 2 kolom). Untuk lebih jelas dapat dilihat pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**.



Gambar 7 Pola Bujur Sangkar

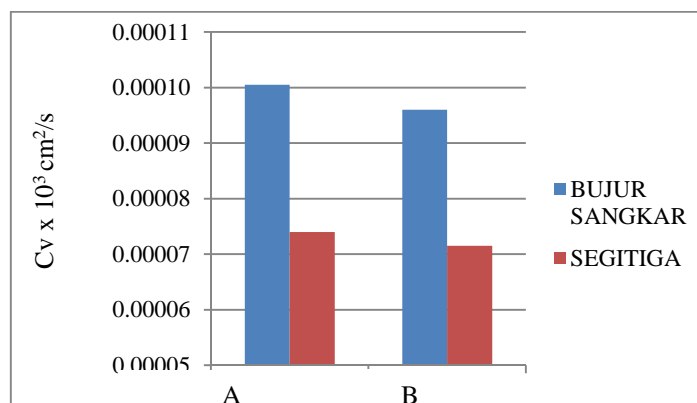
Gambar 8 Pola Segitiga

Koefisien Konsolidasi (Cv)

Nilai koefisien konsolidasi (Cv) dengan kolom campuran pasir dan pecahan beton dengan variasi susunan kolom bujur sangkar dan segitiga dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 9.

Tabel 4. Nilai Koefisien Konsolidasi (Cv) pada P = 0,15 kg/cm²

Titik	Bujur sangkar			Segitiga		
	Cv 1	Cv 2	Rata-rata	Cv 1	Cv 2	Rata-rata
	(cm ² /s)	(cm ² /s)		(cm ² /s)	(cm ² /s)	
A	0.000088	0.000113	0.000101	0.000070	0.000078	0.000074
B	0.000086	0.000106	0.000096	0.000074	0.000069	0.000072



Gambar 9. Perbandingan Nilai Cv pada P = 0,15 kg/cm² antara Susunan Kolom Bujur sangkar dan Segitiga

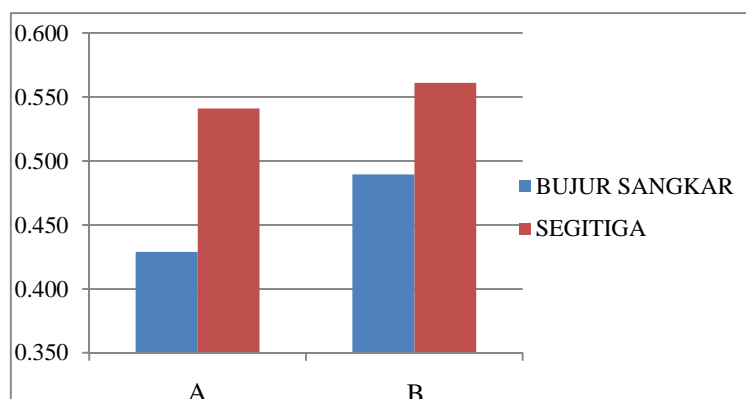
Dari **Tabel 4** dan **Gambar 9** terlihat bahwa susunan kolom bujur sangkar lebih besar nilai koefisien konsolidasinya dari pada segitiga, begitu pula dengan titik A lebih besar dari titik B. Air yang terkandung dalam tanah terserap oleh kolom pada titik A lebih banyak dari titik B sehingga tanah yang berada pada titik A tampak lebih kering. Hal ini menunjukkan bahwa proses konsolidasi dengan menggunakan susunan kolom bujur sangkar membutuhkan waktu yang lebih cepat dari pada susunan kolom segitiga.

Indeks Pemampatan (Cc)

Nilai indeks pemampatan (Cc) yang diperoleh dari penelitian dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Gambar 10**.

Tabel 5. Nilai Indeks Pemampatan (Cc)

Titik	Bujur sangkar			Segitiga		
	Cc 1	Cc 2	Rata-rata	Cc 1	Cc 2	Rata-rata
A	0.434	0.424	0.429	0.549	0.542	0.546
B	0.353	0.626	0.490	0.534	0.588	0.561



Gambar 10. Perbandingan Nilai Cc antara Susunan Kolom Bujur Sangkar dan Segitiga

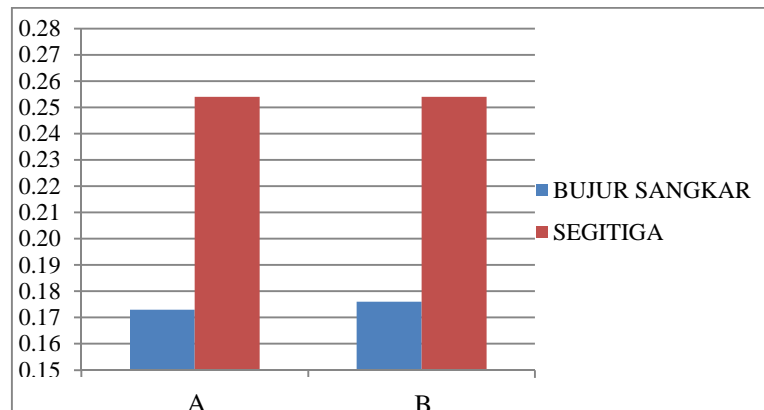
Dari **Tabel 5** dan **Gambar 10** dapat dilihat bahwa nilai indeks pemampatan (Cc) pada susunan kolom bujur sangkar lebih kecil dari susunan kolom segitiga, dan nilai indeks pemampatan terbesar berada pada titik B susunan kolom segitiga. Pola susunan bujur sangkar mengalami kenaikan lebih signifikan dari pada susunan pola segitiga.

Penurunan Konsolidasi (Sc)

Nilai penurunan konsolidasi (Sc) yang diperoleh dari penelitian dapat dilihat pada **Tabel 6** dan **Gambar 11**.

Tabel 6. Nilai Penurunan Konsolidasi (Sc)

Titik	Bujur sangkar			Segitiga		
	Sc 1	Sc 2	Rata-rata	Sc 1	Sc 2	Rata-rata
A	0.170	0.176	0.173	0.241	0.267	0.254
B	0.161	0.191	0.176	0.239	0.277	0.258



Gambar 11. Perbandingan Nilai Sc antara Susunan Bujur sangkar dan Segitiga

Dari **Tabel 6** dan **Gambar 11** terlihat bahwa penurunan terbesar terjadi pada susunan kolom segitiga dari pada susunan kolom Bujur sangkar, dan penurunan pada Titik A dan B mengalami kenaikan pada grafik namun tidak terlalu signifikan.

Dari tiga parameter uji konsolidasi di atas, kecepatan konsolidasi (C_v) pada pola susunan bujur sangkar lebih efektif dari pada susunan segitiga karena jumlah kolom sangat mempengaruhi jalanya aliran air untuk meresap. Kecepatan Konsolidasi (C_v) mempengaruhi nilai Indek Pemampatan (C_c) dan Penurunan Konsolidasi (S_c). Semakin besar nilai C_v maka nilai C_c dan C_c semakin kecil dengan C_v berbanding terbalik dengan C_c dan S_c .

4. KESIMPULAN

Tanah yang berada di Desa Troketon, Kecamatan Pedan, Kabupaten Klaten merupakan tanah lempung yang tergolong dalam CH dalam system USCS, yaitu lempung anorganik plastisitas tinggi, sedangkan menurut metode AASHTO tergolong A-7-6 yaitu tanah berlempung buruk. Nilai C_v menggunakan kolom campuran pasir dan pecahan beton dengan variasi bujur sangkar pada titik A (titik tengah antara 4 kolom) lebih besar dari titik B (titik tengah antara 2 kolom). Nilai C_c dan S_c berbanding terbalik dengan C_v . Nilai C_c dan S_c pada titik B lebih besar dari pada titik A. Sehingga semakin besar nilai C_v maka nilai C_c dan S_c semakin kecil. Nilai C_v drainase vertikal menggunakan kolom campuran pasir dan pecahan beton dengan variasi segitiga pada titik A (titik tengah antara 3 kolom) lebih besar dari titik B (titik tengah antara 2 kolom). Nilai C_c dan S_c berbanding terbalik dengan C_v . Nilai C_c dan S_c pada titik B lebih besar dari pada titik A. Sehingga semakin besar nilai C_v maka nilai C_c dan S_c semakin kecil. Pola susunan bujur sangkar lebih efektif dalam mempercepat konsolidasi tanah lempung dibandingkan pola susunani segitiga.

REFERENSI

- Aspar, W. A. N., & Fitriani, E. N., (2016). *Pengaruh Jarak dan Pola Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak*, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri. Vol.10, No 1, April 2016, (41 - 50)
- Dani, D. R. (2018). *Analisis Konsolidasi Tanah Lempung Lunak Dengan Limbah Beton Sebagai Drainase Vertikal*, Tugas Akhir, S1 Teknik Sipil.Surakarta: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Gratchev, I., Surarak, C., Balasubramaniam, B., Oh, E., (2012). *Consolidation of soft soil by means of vertical drains: field and laboratory observations*, Conference: 11th Australia New Zealand Conference on Geomechanics.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

- Indraratna, B., & Walker, R. (2020). *Vertical drain consolidation with overlapping smear zones*, *Geotechnique* 57, No. 5, 463–467.
- Kindangen, K., Rondonuwu, S. G., Sarajar, A. N. (2019). *Percepatan Konsolidasi Dengan Menggunakan Vertical Drain*. *Jurnal Tekno*, vol. 17, no 71
- Listyawan, A. B., & Syahputra, A. R. (2020). *Perilaku Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Kolom Pecahan Beton Sebagai Drainase Vertikal*, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil X*, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Magnan, J. P. 1983. *Theorie et pratique des drains verticaux*. Tec & Doc.-Lavoisier, Paris.
- Malikhi, I., Susanto, A., Listyawan, A. B. (2016) *Studi Perbandingan Kuat Geser Tanah Lempung Lunak Yang Distabilisasi Dengan Kolom Kapur Dan Kolom Campuran Pasir Kapur*, Tugas Akhir, S1 Teknik Sipil.Surakarta: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
- Merdhiyanto, P. (2015). *Sand-Lime Column Stabilization On The Consolidation Of Soft Clay Soil*, Tugas Akhir, S1 Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Rini, R. E. (2015). “Perbandingan Konsolidasi Tanah Lempung Lunak Yang Distabilisasi Dengan Kolom Campuran Pasir Kapur dan Kolom Pasir di atas Kapur”.Tugas Akhir S1 Teknik Sipil.Surakarta: Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.