

Kajian Pengaruh Penambahan *Silica Fume* (Limbah *Sandblasting*) terhadap Nilai Indeks Kompresibilitas Tanah Lempung Ekspansif Cikarang

Udien Yulianto¹, Ike Oktaviani², Yudi Setiawan³, Jujuk Kusumawati⁴

Institut Teknologi Budi Utomo, Jakarta, Indonesia

udien@itbu.ac.id¹

Abstrak

Kata Kunci:

Silica Fume,
Indeks
Kompresibilitas,
Tanah Lempung
Ekspansif.

Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang memiliki potensi pengembangan dan penyusutan sangat besar akibat pengaruh dari perubahan kadar airnya. Potensi tanah inilah yang sering menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan di atasnya. Stabilisasi tanah lempung ekspansif dilakukan dengan cara perbaikan tanah, penambahan *Silica fume* ke dalam tanah lempung ekspansif akan memperbaiki sifat tanah dengan menurunkan nilai indeks kompresi tanah dan indeks pengembangan tanah yang diambil dari wilayah Cikarang, Jawa Barat dengan melakukan uji laboratorium. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai indeks kompresi tanah dan indeks pengembangan tanah sebelum dan setelah penambahan *Silica fume* dengan persentase 5%, 10%, dan 20%. Pada penelitian ini didapatkan nilai indeks kompresi paling rendah terjadi pada campuran 10% yaitu 31,21%, nilai ini mengalami penurunan sebesar 13,73% dari nilai indeks kompresi tanah asli yaitu 36,17%. Sedangkan penurunan nilai indeks pengembangan paling rendah juga didapatkan pada campuran 10% yaitu 4,36%, nilai ini mengalami penurunan 55,78% dari nilai indeks pengembangan yaitu 9,87%.

Abstract

Key Word:

Silica Fume,
Compressibility
index,
Expansive clay
soil.

Expansive clay soil is a type of soil that has a very large potential for expansion and shrinkage due to the influence of changes in its water content. This soil potential often causes damage to the building structure above it. Stabilization of expansive clay soil is carried out by improving the soil, adding *Silica fume* to expansive clay soil will improve soil properties by reducing the value of the soil compression index and soil expansion index taken from the Cikarang area, West Java by conducting laboratory tests. The purpose of this study was to determine the value of the soil compression index and soil expansion index before and after the addition of *Silica fume* with a percentage of 5%, 10%, and 20%. In this study, the lowest compression index value was obtained in a mixture of 10%, namely 31.21%, this value decreased by 13.73% from the original soil compression index value of 36.17%. While the lowest decrease in the expansion index value was also obtained in a mixture of 10%, namely 4.36%, this value decreased by 55.78% from the expansion index value of 9.87%.

Copyright © 2025 Udien Yulianto, Ike Oktaviani, Yudi Setiawan, Jujuk Kusumawati
This work is licensed under an **Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)**

PENDAHULUAN

Silica fume merupakan limbah dari proses *sandblasting*. Untuk saat ini limbah *sandblasting* dari industri fabrikasi baja, industri galangan kapal semakin banyak dan menumpuk. Untuk itu perlu dimanfaatkan demi mengurangi volume limbah tersebut sehingga limbah ini dapat diolah dan digunakan. Potensi tanah inilah yang sering menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan di atasnya. Jika tanah setempat tidak mempunyai daya dukung yang baik dan untuk mengambil tanah dari luar daerah memerlukan biaya yang mahal dan tidak efisien, maka upaya yang dapat dilakukan adalah dengan mencampur tanah dasar yang telah ada dengan bahan tambah yang dinamakan stabilisasi yang dapat membantu mendapatkan sifat tanah dasar yang diinginkan.

Ada 2 macam stabilisasi tanah, yaitu perbaikan tanah dan perkuatan tanah. Pada penelitian ini, stabilisasi tanah lempung ekspansif dilakukan dengan cara perbaikan tanah. Perbaikan tanah merupakan suatu jenis stabilisasi tanah yang bertujuan untuk memperbaiki dan/atau menjaga kemampuan dan kinerja tanah sesuai syarat teknis yang dibutuhkan. Perbaikan tanah ini menggunakan metode kimiawi yang mana caranya adalah dengan menambahkan suatu bahan kimia ke dalam tanah. Sehingga terjadi reaksi kimia antara tanah dan material pencampurnya.

Stabilisasi tanah diartikan untuk merubah sifat-sifat tanah asli dengan cara antara lain menambahkan suatu bahan-bahan tertentu atau perlakuan khusus yang mengakibatkan perbaikan sifat-sifat tanah asli tersebut. Teknik stabilisasi dengan mencampur bahan *Silica fume* dikombinasikan dengan stabilisasi mekanis pemadatan merupakan cara sederhana dan cukup murah dilakukan. Penambahan *Silica fume* ke dalam tanah lempung ekspansif akan memperbaiki sifat tanah dengan menurunkan tingkat kompresi tanah, sedangkan

pemadatan tanah akan meningkatkan kapasitas dukungnya. Penelitian ini melakukan identifikasi tanah lempung ekspansif yang berada di wilayah Cikarang, Jawa Barat dengan melakukan uji laboratorium.

Definisi Tanah

Tanah adalah lapisan permukaan bumi yang berasal dari material induk yang telah mengalami proses lanjut, karena perubahan alami di bawah pengaruh air, udara, dan macam-macam organisme baik yang masih hidup maupun yang telah mati. Tingkat perubahan terlihat pada komposisi, struktur dan warna hasil pelapukan (Dokuchaev, 1870 dalam Fauziek dan Suhendra, 2018). Dalam ilmu mekanika tanah terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang umum dikelompokkan. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butiran dan batas-batas Atterberg, sistem-sistem tersebut adalah: 1) Sistem Klasifikasi American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO); 2) Sistem Klasifikasi Tanah Unified Soil Classification System (USCS): a) Tanah berbutir kasar (coarse-grained-soil), kurang dari 50% lolos saringan No. 200, yaitu tanah berkerikil dan berpasir; b) Tanah berbutir halus (fine-grained-soil), lebih dari 50 % lolos saringan No. 200, yaitu tanah berlanau dan berlempung; c) Tanah Organik. (gambut/humus), Secara laboratorium dapat ditentukan jika perbedaan batas cair yang belum dioven sebesar > 25%

Klasifikasi Umum	Tanah berbutir (35 atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)							Tanah lanau-lempung (lebih dari 35 % dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)			
	A-1		A3	A2				A-4	A-5	A-6	A-7
											A-7.5 * A-7.6 *
	Klasifikasi Kelompok	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7			
Analisis ayakan (% lolos)											
No. 10	< 50	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 40	≤ 30	≤ 50	≤ 51	---	---	---	---	---	---	---	---
No. 200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 batas cair (LL)	---	---	---	< 41	> 41	< 40	> 40	< 40	< 41	< 40	> 41
Indeks elastisitas (PI)	< 6		NP	< 10	< 10	> 11	> 11	< 10	< 10	> 11	> 11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan dasar tanah	Baik sekali sampai baik							sedang sampai jelek			
Keterangan :	*	Untuk A-7.5, PI<LL - 30									
	**	Untuk A-7.6, PI>I.I. - 30									

Gambar 1 : Klasifikasi Tanah AASHTO Sumber : Das, 1995

Divisi Utama		Symbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar ter-tahan saringan no. 4 (4.75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau PI < 7 Batas-batas Atterberg di atas garis A atau PI > 7 $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10}d_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau PI < 7 Batas-batas Atterberg di atas garis A atau PI > 7
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus	
			Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir - lempung	
	Pasir lebih dari 50 % ter-tahan saringan no. 4 (4.75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir - lempung	
			Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak	
			Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	Diagram plastisitas untuk mengklasifikasi tanah berbutir halus yang berdasarkan dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasi yang mungkin berlaku.
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	
			Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau	
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %	ML	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir	
		CL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
		OL	Lanau tak organik atau pasir halus dinotome, lanau elastis	
Tanah dengan kadar organik tinggi	Pt	MH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clay")	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	

Gambar 2 : Klasifikasi Tanah AASHTO. Sumber : (Hardiyatmo, 1992)

Pengertian Tanah Lempung

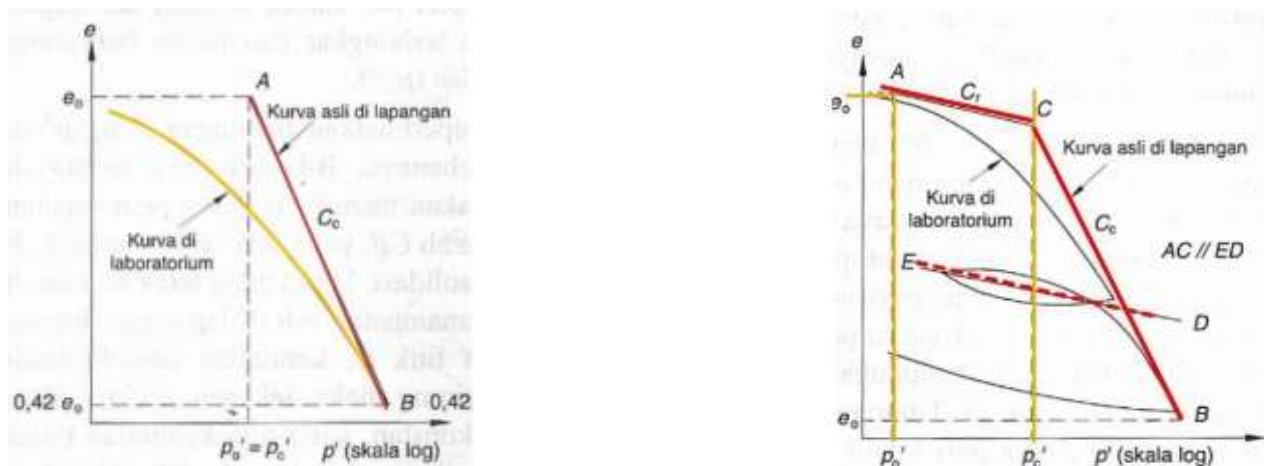
Tanah lempung adalah tanah yang memiliki partikel-partikel mineral tertentu yang menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampuri dengan air. Tanah lempung adalah satu istilah yang dipakai untuk menyatakan tanah yang berbutir halus yang memiliki sifat kohesi, plastisitas, tidak memperlihatkan sifat dilatasi, dan tidak mengandung jumlah bahan kasar yang berarti sedangkan fraksi lempung merupakan bagian berat butir-butir dari tanah yang lebih halus dari 0,002 mm. Karakteristik Tanah Lempung: 1) Mineral Lempung; 2) Kimia Tanah; 3) Plastisitas tanah; 4) Struktur tanah; 5) Berat isi kering

Pengertian Silica Fume

Menurut standar “Specification for Silica fume for Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortar” (ASTM.C.1240)9 Silica fume adalah material pozzolan yang halus, dimana komposisi silika lebih banyak dihasilkan dari tanur tinggi atau sisa produksi silikon atau alloy besi silikon (dikenal sebagai gabungan antara micro silica dengan Silica fume). Karakteristik Silica Fume: 1) Pozzolanic (tidak akan bertambah kuat bila dicampur dengan air); 2) Cementitious (akan bertambah kuat bila dicampur dengan air); 3) Kombinasi keduanya, contohnya termasuk abu lalat

Konsolidasi

Menurut (Soedarmo, 1993), konsolidasi adalah proses pengecilan volume secara bertahap dan perlahan-lahan pada tanah jenuh maksimal dengan permeabilitas rendah akibat pengaliran sebagian air pori. Proses tersebut berlangsung terus-menerus sampai kelebihan tekanan angka pori yang disebabkan oleh kenaikan tegangan total benar-benar hilang. Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan. Menurut (Hardiyatmo, 2012 dalam Suwandi, 2019), dalam proses konsolidasi yang sesungguhnya adalah terjadinya perubahan volume sesuai waktu dan besar tekanannya.



Gambar 3 : Kiri (*normally consolidated*), Kanan (*Overconsolidated*). Sumber: (Hardiyatmo, 2012 dalam Suwandi, 2019)

METODE

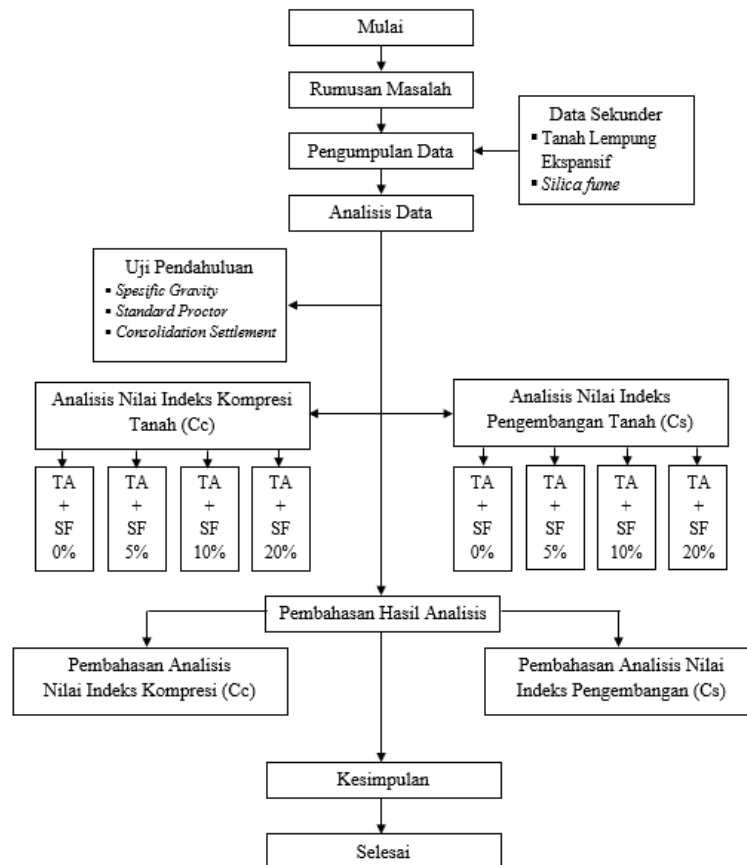
Jenis Penelitian

Proses penelitian dilakukan dengan cara melakukan kajian eksperimen dengan melakukan penambahan material Silica fume terhadap tanah asli, setelah itu akan dilakukan proses pengujian berat jenis tanah (specific gravity), pemadatan tanah (standard proctor), dan pengujian konsolidasi (consolidation settlement).

Penelitian ini menggunakan tanah lempung ekspansif yang diambil dari Desa Cibat, Kec. Cikarang Selatan, Kab. Bekasi, Prov. Jawa Barat dan dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Budi Utomo dengan menggunakan peralatan yang tersedia.

Pola Pikir/Kerangka Pemikiran

Pada penelitian ini dimulai dengan dua butir rumusan masalah yang kemudian dilakukan proses pengumpulan data yaitu berupa data primer. Kemudian dari hasil analisis data dilakukan pembahasan hasil analisis untuk mencapai sebuah tujuan atau kesimpulan yang menjawab rumusan masalah yang sudah ditentukan. Adapun kerangka pemikiran dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 4. Pola Pikir/Kerangka Pemikiran. Sumber: Pola Pikir Penelitian

Metode Penelitian

Metode Pengumpulan Data

Pada penelitian ini metode pengumpulan data yang digunakan adalah menggunakan data sekunder. Data penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari hasil pengujian sampel tanah dan penambahan Silica fume untuk mengetahui hasil dari data tersebut, akan dilakukan beberapa prapengujian tanah yang dilakukan, yaitu uji berat jenis (specific gravity), uji pemadatan tanah (standar proctor), dan uji konsolidasi (consolidation settlement).

Metode Analisis Data

Metode analisis data merupakan suatu langkah yang paling menentukan dari suatu penelitian, karena analisis data berfungsi untuk menyimpulkan hasil penelitian. Beberapa analisis data yang dilakukan yaitu uji pendahuluan meliputi uji berat jenis tanah (specific gravity) dan uji pemadatan tanah (standard proctor). Dan setelahnya uji konsolidasi tanah (consolidation settlement) yang di dalamnya ada uji pemampatan tanah dan uji pengembangan tanah. Seluruh data yang didapat nantinya akan disajikan dalam bentuk grafik, sampel, mapun deskripsi. Berikut adalah analisis data dalam beberapa pengujian yang dilakukan:

Uji Pendahuluan

Pengujian Berat Jenis Tanah (Specific Gravity)

Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai berat jenis tanah (Gs) sebelum dan sesudah ditambah Silica fume. Adapun urutan pelaksanaan pengujian adalah sebagai berikut: 1) Keringkan benda uji dalam oven pada temperatur $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, setelah itu dinginkan dalam desikator; 2) Mencuci piknometer atau botol ukurdengan air suling, kemudian dikeringkan dan selanjutnya ditimbang (W1); 3) Masukkan benda uji ke dalam piknometer atau botol ukur yang digunakan, kemudian timbang (W2); 4) Tambahkan air suling ke dalam piknometer atau botol ukur yang berisi benda uji, sehingga piknometer atau botol ukur terisi duapertiganya; 5) Untuk benda uji yang mengandung lempung diamkan benda uji terendam selama 24 jam atau lebih; 6) Panaskan piknometer atau botol ukur yang berisi rendaman benda uji dengan hati-hati selama 10 menit atau lebih sehingga udara dalam benda uji ke luar seluruhnya. Untuk mempercepat proses pengeluaran udara, piknometer atau botol ukur dapat dimiringkan sesekali; 7) Rendamlah piknometer atau botol ukur dalam bak perendam, sampai temperaturnya tetap. Tambahkan air suling secukupnya sampai penuh.

Keringkan bagian luarnya, lalu timbang (W3); 8) Ukur temperatur isi piknometer atau botol ukur, untuk mendapatkan factor koreksi (K); 9) Bila isi piknometer atau botol ukur belum diketahui, isinya ditentukan sebagai berikut: a) Kosongkan dan bersihkan piknometer atau botol ukur yang akan digunakan; b) Isi piknometer atau botol ukur dengan air suling yang temperaturnya sama, kemudian keringkan dan timbang (W4).

Pengujian Pemadatan Tanah (Standard Proctor)

Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (MDD) tanah sebelum dan setelah ditambah Silica fume. Grafik hubungan diantara kadar air (Wc) dan juga berat - volume kering (γ_d) tanah. Berat-volume kering dapat ditentukan dengan langkah-langkah rumus berikut.

a) Volume alat

$$= 1/4 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot t \dots \dots \dots (3.3)$$

b) Berat tanah basah

$$= (\text{berat tanah basah} + \text{cetakan}) - \text{berat alat} \dots \dots \dots (3.4)$$

c) Berat volume tanah basah (γ_b) $\gamma_b = (\text{Berat tanah basah})/(\text{Volume cetakan}) \dots \dots \dots (3.5)$

$$\text{Kadar air (w)} = (W2 - W3)/(W3 - W1) \times 100\% \dots \dots \dots (3.6)$$

Keterangan:

W1 = berat cawan (gram)

W2 = berat cawan + tanah basah (gram)

W3 = berat cawan + tanah kering (gram)

d) Berat volume tanah kering (γ_d)

$$\gamma_d = \gamma_b / (1 + W/100) \dots \dots \dots (3.7)$$

e) Zero Air Void (ZAV)

$$ZAV = (G_s \cdot \left[\frac{\gamma}{\gamma_w} \right] - w) / ((1 + W/100 \cdot G_s)) \dots \dots \dots (3.8)$$

Pengujian Pemampatan Tanah (Indeks Kompresi Tanah) Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai indeks kompresi (Cc) tanah. Proses pengujian ini dilakukan menggunakan alat konsolidasi.

Adapun urutan pelaksanaan pengujian adalah sebagai berikut: a) Benda uji dan cincin ditimbang menggunakan neraca dengan ketelitian 0.1 gr; b) Menempatkan batu pori di bagian atas dan bawah dari cincin sehingga benda uji yang sudah dilapisi kertas saring/filter terapat kedua buah batu pori kemudian dimasukkan ke dalam sel konsolidasi; c) Memasukkan plat penumpu di atas batu pori; d) Meletakkan sel konsolidasi yang sudah terisi benda uji pada alat konsolidasi sehingga bagian runcing dari plat penumpu menyentuh tepat pada plat pembebanan; e) Mengatur kedudukan arloji (arloji harus menunjukkan angka nol) kemudian membaca dan mencatatnya; f) Memasang beban pertama sebesar 0.825 kg diikuti dengan pengaturan nivo agar seimbang; g) Pada saat memasang beban 0.825 kg diamati pembacaan arloji mulai (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180, 330, 420, 1440) menit; h) Setelah langkah (g) selesai, maka beban ditambah sehingga menjadi 1.65 kg; i) Demikian seterusnya untuk beban yang berbeda yaitu untuk pembebanan (3.3, 6.6, 13.2, dan 26.4) kg diamati pembacaan arloji mulai menit (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180, 330, 420, 1440) menit;

Pengujian Pengembangan Tanah

Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai indeks pengembangan (Cs) tanah. Proses pengujian ini dilakukan setelah dilakukannya pengujian pemampatan tanah dan menggunakan alat konsolidasi.

Metode Pembahasan Hasil Analisis

Pembahasan hasil analisis dilakukan dengan cara membandingkan hasil uji berat jenis tanah (specific gravity), uji pemadatan tanah (standard proctor), dan uji konsolidasi tanah (consolidation settlement) sebelum dan ditambah Silica fume dengan rincian sebagai berikut:

Pembahasan Hasil Analisis Uji Indeks Kompresi Tanah (Cc)

Metode pembahasan hasil analisis nilai indeks kompresi tanah lempung ekspansif setelah penambahan Silica fume. Dalam SNI 2812:2011 (BSN, 2011) tentang uji konsolidasi satu dimensi, hasil uji disajikan dalam kurva hubungan angka pori e dan p (skala logaritmik). Parameter indeks pemampatan atau indeks kompresi didefinisikan sebagai kemiringan dari bagian lurus kurva $e - \log p$. Nilai indeks pemampatan menunjukkan kemampuan tanah dalam memampat, ketika terjadi peristiwa konsolidasi. Secara matematika, nilai C_c ini merupakan nilai yang tidak memiliki satuan (non dimensional unit). Kemiringan bagian yang lurus dari kurva $e - \log p$, untuk penambahan tekanan dari p_1 menjadi p_2 dinyatakan seperti persamaan 3.9.

$$C_c = (e_1 - e_2) / (\log \{p_2/p_1\}) \dots\dots\dots (3.9)$$

C_c = nilai indeks kompresi
 e = nilai banding ruang e (tanpa dimensi)
 p = tegangan (skala logaritma)

Untuk menghitung nilai C_c (e_1 dan e_2) didapat dari hasil visual grafik, namun untuk mendapatkan grafik tersebut perlu dilakukan perhitungan dengan rumus-rumus berikut ini.

Kadar Air Awal

$$W_w = W_3 - W_2$$

$$W_s = W_3 - W_1$$

$$MC = (W_w/W_s) \times 100 \dots\dots\dots (3.10)$$

Keterangan:

W_1 = berat cincin (gram)
 W_2 = berat tanah basah + cincin sebelum uji (gram)
 W_3 = berat tanah kering + cincin setelah uji (gram)
 W_w = berat air (gram)
 W_s = berat kepadatan tanah (gram)
 MC = kadar air (%)

Kadar Air Akhir

$$W_{w2} = W_4 - W_3$$

$$W_{s2} = W_w$$

$$MC = (W_{w2}/W_{s2}) \times 100 \dots\dots\dots (3.11)$$

Keterangan:

W_3 = berat tanah kering + cincin setelah uji (gram)
 W_4 = berat tanah basah + cincin setelah uji (gram)
 W_w = berat air (gram)
 W_s = berat kepadatan tanah (gram)
 MC = kadar air akhir (%)

H_s dan e_0

$$H_s = (W_4 - W_1) / (A \times G_s \times \gamma_w \times (1 + MC \text{ akhir}/100)) \dots\dots\dots (3.12)$$

$$e_0 = ((H_0 - H_s) / H_s) \dots\dots\dots (3.13)$$

Keterangan:

H_s = tinggi tanah padat
 W_1 = berat cincin (gram)
 W_4 = berat tanah basah + cincin setelah uji (gram)
 A = luas penampang melintang (cm^2)
 G_s = berat jenis tanah (g/cm^3)
 γ_w = berat jenis air (g/cm^3)
 MC = kadar air akhir (%)
 e_0 = angka pori awal
 H_0 = tinggi awal sampel tanah

e vs kurva log P

$$\Delta H = (C \times LC) - B \dots\dots\dots (3.14)$$

$$\Delta e = \Delta H / H_s \dots\dots\dots (3.15)$$

$$e = e_0 - \Delta e \dots\dots\dots (3.16)$$

Keterangan:

C = pembacaan akhir beban yang masuk
 LC = hitungan terkecil
 B = pembacaan awal beban yang masuk
 e = angka pori

Metode pembahasan hasil analisis nilai Indeks Kompresi (C_c) pada tanah lempung ekspansif setelah penambahan Silica fume, yaitu: a) Nilai Indeks Kompresi (C_c) tanah lempung ekspansif + Silica fume 5%; b) Nilai Indeks Kompresi (C_c) tanah lempung ekspansif + Silica fume 10%; c) Nilai Indeks Kompresi (C_c) tanah lempung ekspansif + Silica fume 20%

Pembahasan Hasil Analisis Uji Indeks Pengembangan Tanah (Cs)

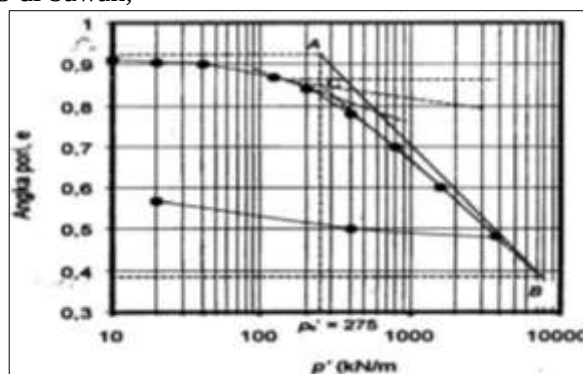
Sedangkan untuk indeks pengembangan (Cs) ditentukan dari bagian kurva pengurangan tekanan. Indeks pengembangan Cs didefinisikan sebagai kemiringan kurva pengurangan tekanan dari grafik $e - \log p$, untuk pengurangan tekanan p_1 menjadi p_2 dinyatakan seperti persamaan 3.2.

$$Cs = (e_1 - e_2) / (\log \{p_2/p_1\}) \dots \dots \dots (3.17)$$

Keterangan:

- Cs = nilai indeks pengembangan
e = nilai banding ruang e (tanpa dimensi)
p = tegangan (skala logaritma)

Metode pembahasan hasil analisis nilai Indeks Pengembangan (Cs) pada tanah lempung ekspansif setelah penambahan Silica fume, yaitu: a) Nilai Indeks Pengembangan (Cs) tanah lempung ekspansif + Silica fume 5%; b) Nilai Indeks Pengembangan (Cs) tanah lempung ekspansif + Silica fume 10%; c) Nilai Indeks Pengembangan (Cs) tanah lempung ekspansif + Silica fume 20%. Sama seperti untuk menghitung nilai Cc, mencari nilai Cs pun (e_1 dan e_2) didapat dari hasil visual grafik, setelah mendapatkan titik-titik sesuai perhitungan (seperti pada pembahasan Cc) selanjutnya adalah titik tersebut dibuatkan garis sehingga akan terbentuk seperti Gambar 3.3 di bawah,



Gambar 5. Grafik Penentuan Nilai Cc dan Cs. Sumber: Bahan Ajar Mekanika Tanah II

Setelah dilakukan beberapa rangkaian perhitungan dan pembahasan analisis, selanjutnya hasil dari masing-masing analisis pengujian dibuat rekapitulasi sehingga bisa dilihat trendline dari masing-masing rasio campuran mengalami kenaikan atau penurunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tanah Lempung

Pada penelitian ini didapatkan sampel tanah lempung yang berasal dari Desa Cibatu, Kec. Cikarang Selatan, Kab. Bekasi, Prov. Jawa Barat. Pengambilan sampel tanah ini dilakukan dengan cara dicangkul atau tanah timbunan yang sudah dikeruk excavator lalu dimasukkan ke dalam karung sehingga tanah ini dikategorikan sebagai tanah terganggu atau disturbed.

Silica Fume

Silica fume dipilih sebagai campuran pada penelitian ini didasarkan karena Silica fume memiliki bentuk bola dan ukuran partikel yang sangat halus, menjadikannya bahan pozzolan yang sangat aktif.

Analisis Data

Uji Pendahuluan

Pengujian Berat Jenis Tanah (*Specific Gravity*)

Tabel 1. Hasil Nilai Gs Tanah + Variasi Campuran Silica Fume

NO	Jenis Tanah	Piknometer Kosong (botol 50ml) (gram)	Piknometer + Aquades Jenuh (gram)	Piknometer + Tanah (gram)	Piknometer + Tanah + Campuran (gram)	Piknometer + Tanah + Campuran + Aquades (full)	HASIL
1	Tanah Asli	18,0	68,0	34,7	-	78,7	2,71
2	TA + Silica fume 5%	22,5	71,4	-	40,5	82,7	2,63
3	TA + Silica fume 10%	21,6	70,6	-	39,8	81,7	2,51
4	TA + Silica fume 20%	19,4	69,3	-	39,5	81,2	2,42

Sumber : Olahan Penelitian

Dari hasil perhitungan nilai G_s tanah asli di atas, jenis tanah masuk dalam golongan tanah lempung tidak organic, yaitu dengan kisaran 2,68 – 2,75.

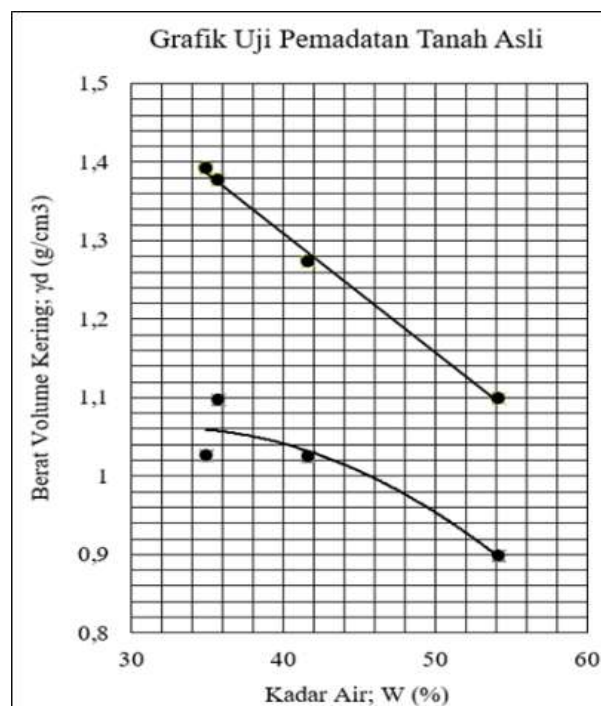
Pengujian Berat Jenis Tanah (*Specific Gravity*)

Sampel Tanah Asli

Tabel 2. Data Hasil Uji Pemadatan Tanah Asli

Sampel Tanah Asli	Berat Cawan (gr)	Sebelum dioven (gr)	Setelah dioven (gr)	Berat Air (gr)	Berat Tanah Kering (gr)	Kadar Air (%)	Berat Volume Tanah Basah (γ_b)	Berat Volume Tanah Kering (γ_d)	ZAV
1	34,2	84,6	71,3	13,3	37,10	35,7	1,49	1,10	1,38
2	34,3	83,3	70,6	12,7	36,3	35,0	1,38	1,03	1,39
3	32,8	85,5	70,0	15,5	37,2	41,7	1,45	1,03	1,27
4	34,2	86,0	67,8	18,2	33,6	54,2	1,38	0,90	1,10

Sumber : Olahan Penelitian



Gambar 6. Grafik Penentuan Nilai C_c dan C_s . Sumber: Bahan Ajar Mekanika Tanah II

Didapatkan hasil:

MDD : 1,12 gr/cm³

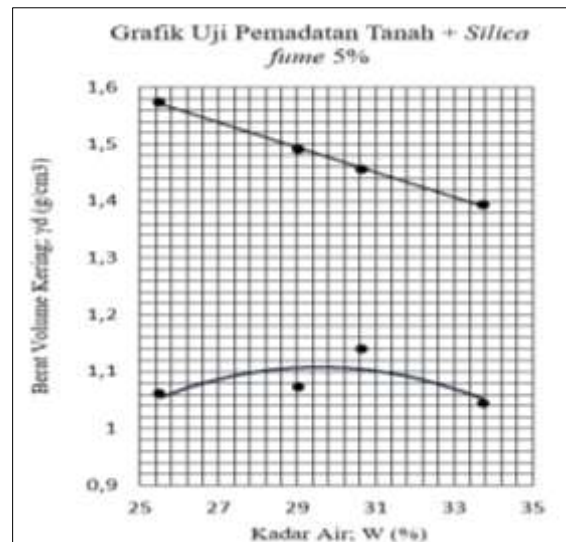
OMC : 37,5%

Sampel Tanah Asli + *Silica Fume* 5%

Tabel 3. Data Hasil Uji Pemadatan Tanah + *Silica Fume* 5%

Sampel Tanah + <i>Silica fume</i> 5%	Berat Cawan (gr)	Sebelum dioven (gr)	Setelah dioven (gr)	Berat Air (gr)	Berat Tanah Kering (gr)	Kadar Air (%)	Berat Volume Tanah Basah (γ_b)	Berat Volume Tanah Kering (γ_d)	ZAV
1	34,9	120,2	101,0	19,2	66,1	29,0	1,38	1,07	1,49
2	34,9	119,7	99,8	19,9	64,9	30,7	1,49	1,14	1,46
3	32,1	120,1	97,9	22,2	65,8	33,7	1,40	1,04	1,39
4	34,1	119,7	102,3	17,4	68,2	25,5	1,33	1,06	1,57

Sumber : Olahan Penelitian



Gambar 7. Grafik Hubungan W dan γ_d Tanah + Silica Fume 5%. Sumber: Olahan Penelitian

Didapatkan hasil:

MDD : 1,15 gr/cm³

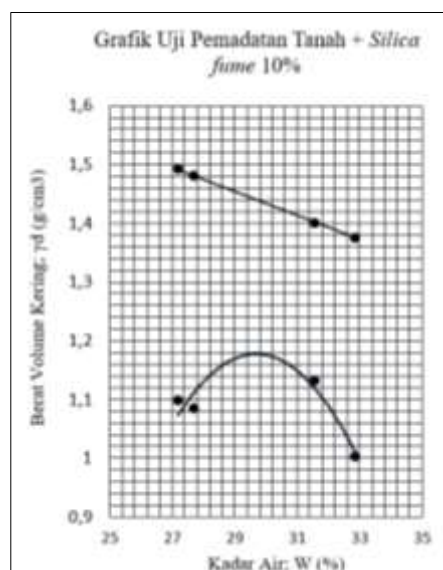
OMC : 30%

Sampel Tanah Asli + Silica Fume 5%

Tabel 4. Data Hasil Uji Pemadatan Tanah Asli

Sampel Tanah + Silica fume 10%	Berat Cawan (gr)	Sebelum dioven (gr)	Setelah dioven (gr)	Berat Air (gr)	Berat Tanah Kering (gr)	Kadar Air (%)	Berat Volume Tanah Basah (γ_b)	Berat Volume Tanah Kering (γ_d)	ZAV
1	31,2	120,6	101,2	19,4	70,0	27,7	1,38	1,08	1,48
2	35,1	120,5	100,0	20,5	64,9	31,6	1,49	1,13	1,40
3	33,5	119,1	100,8	18,3	67,3	27,2	1,40	1,10	1,49
4	34,6	119,5	98,5	21,0	63,9	32,9	1,33	1,00	1,38

Sumber : Olahan Penelitian



Gambar 7. Grafik Hubungan W dan γ_d Tanah + Silica fume 10%. Sumber: Olahan Penelitian

Didapatkan hasil:

MDD : 1,20 gr/cm³

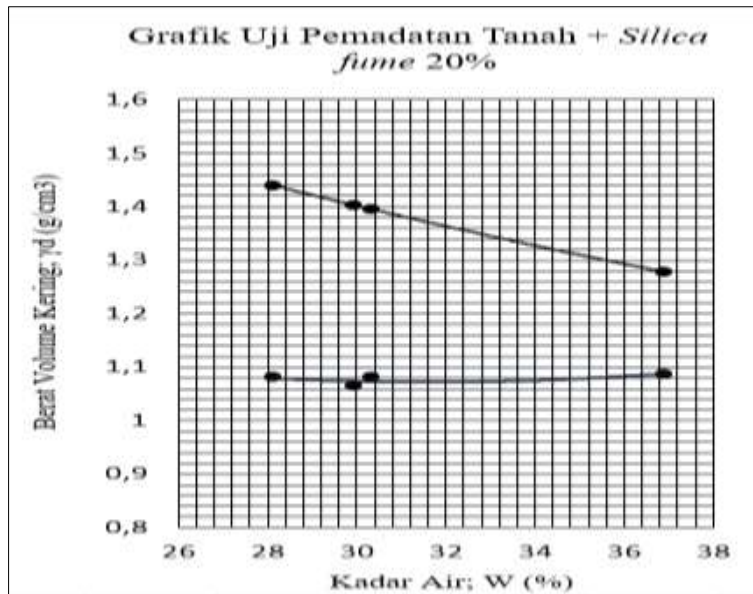
OMC : 29,7%

Sampel Tanah Asli + *Silica Fume* 20%

Tabel 5. Data Hasil Uji Pemadatan Tanah + *Silica Fume* 20%

Sampel Tanah : <i>Silica fume</i> 20%	Berat Cawan (gr)	Sebelum dioven (gr)	Setelah dioven (gr)	Berat Air (gr)	Berat Tanah Kering (gr)	Kadar Air (%)	Berat Volume Tanah Basah (γ _b)	Berat Volume Tanah Kering (γ _d)	ZAV
1	34,7	120,6	100,6	20,0	65,9	30,3	1,41	1,08	1,40
2	32,8	120,7	101,4	19,3	68,6	28,1	1,38	1,08	1,44
3	35,1	118,2	95,8	22,4	60,7	36,9	1,49	1,09	1,28
4	34,0	119,5	99,8	19,7	65,8	29,9	1,38	1,07	1,40

Sumber : Olahan Penelitian



Gambar 8. Grafik Hubungan W dan γ_d Tanah + *Silica fume* 20%. Sumber: Olahan Penelitian

Didapatkan hasil:

MDD : 1,15 gr/cm³

OMC : 30%

Rekap Hasil Uji Pemadatan Tanah Asli dan Tanah + *Silica Fume*

Tabel 6. Data Hasil Uji Pemadatan Tanah + *Silica Fume*

No	Jenis Sampel Tanah	OMC (%)	MDD (gr/cm ³)
1	Tanah Asli	37,5	1,12
2	Tanah Asli + <i>Silica fume</i> 5%	30,0	1,15
3	Tanah Asli + <i>Silica fume</i> 10%	29,7	1,20
4	Tanah Asli + <i>Silica fume</i> 20%	29,7	1,11

Sumber : Olahan Penelitian

Analisis Nilai Cc Tanah Setelah Penambahan *Silica Fume*

Sampel Tanah Asli

Dibawah ini akan dicontohkan Langkah-langkah perhitungan untuk mencari nilai Cc.

a) Kadar Air Awal

$$W_w = 143 - 111,6 = 31,4 \text{ gram}$$

$$W_s = 111,6 - 34,2 = 77,4 \text{ gram}$$

$$MC = (31,4 / 77,4) \times 100 = 40,57\%$$

b) Kadar Air Akhir

$$W_{w2} = 149 - 111,6 = 37,4 \text{ gram}$$

$$W_{s2} = 77,4 \text{ gram}$$

$$MC = (37,4 / 77,4) \times 100 = 48,32\%$$

c) Hs dan e0

$$\begin{aligned}H_s &= (149 - 34,2)/(28,27 \times 2,71 \times 1 \times (1 + 48,32/100)) = 1,01 \\&= ((2 - 1,01) / 1,01) = 0,98 \\e \text{ vs kurva log } P \\ \Delta H &= (95 \times 0,001) - 0 = 0,095 \\ \Delta e &= 0,095 / 1,01 = 0,094 \\ e &= 0,98 - 0,094 = 0,886 \leftarrow \text{nilai } e \text{ tekanan } 0,25\end{aligned}$$

Perhitungan di atas diulangi (a sampai d) hingga mencapai tekanan 8 (maksimum) sehingga mendapatkan nilai e dan dari nilai e tersebut dibentuklah grafik. Dari grafik tersebut bisa dilihat secara visual garis lurus antara titik e_1 dan titik e_2 sehingga akan didapatkan hasil sebagai berikut:

$$\begin{aligned}C_c &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_c &= (0,564 - 0,673)/(\log(2/(4))) \\C_c &= 0,3617 \rightarrow 36,17\%\end{aligned}$$

1) Sampel Tanah Asli + Silica Fume 5%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_c &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_c &= (0,617 - 0,520)/(\log(4/2)) \\C_c &= 0,3200 \rightarrow 32,00\%\end{aligned}$$

2) Sampel Tanah Asli + Silica Fume 10%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_c &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_c &= (0,647 - 0,554)/(\log(4/2)) \\C_c &= 0,3120 \rightarrow 31,20\%\end{aligned}$$

3) Sampel Tanah Asli + Silica Fume 20%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_c &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_c &= (0,659 - 0,559)/(\log(4/2)) \\C_c &= 0,3321 \rightarrow 33,21\%\end{aligned}$$

Analisis Nilai C_s Tanah Setelah Penambahan Silica Fume

1) Sampel Tanah Asli

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_s &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_s &= (0,435 - 0,465)/(\log(2/4)) \\C_s &= 0,0986 \rightarrow 9,86\%\end{aligned}$$

2) Sampel Tanah Asli + Silica fume 5%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_s &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_s &= (0,459 - 0,443)/(\log(4/2)) \\C_s &= 0,0516 \rightarrow 5,16\%\end{aligned}$$

3) Sampel Tanah Asli + Silica fume 10%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_s &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_s &= (0,502 - 0,489)/(\log(4/2)) \\C_s &= 0,0436 \rightarrow 4,36\%\end{aligned}$$

4) Sampel Tanah Asli + Silica fume 20%

$$\begin{aligned}\text{Didapatkan hasil:} \\C_s &= (e_1 - e_2)/(\log(p_2/p_1)) \\C_s &= (0,494 - 0,478)/(\log(4/2)) \\C_s &= 0,0542 \rightarrow 5,42\%\end{aligned}$$

Pembahasan Hasil Analisis

Pembahasan hasil analisis nilai C_c tanah setelah penambahan silica fume

Hasil pembahasan analisis nilai indeks kompresi menjelaskan rekapitulasi data yang didapatkan dari pengujian konsolidasi dengan sampel tanah asli dan tanah asli ditambah Silica fume.

Tabel 7. Nilai e Indeks Kompresi Tanah Asli + *Silica Fume*

Tekanan kg/cm ²	Angka Pori (e)			
	Tanah Asli	TA + SF %%	TA + SF 10%	TA + SF 20%
0,25	0,879	0,766	0,779	0,792
0,5	0,844	0,752	0,769	0,783
1	0,766	0,709	0,728	0,735
2	0,667	0,617	0,647	0,659
4	0,558	0,520	0,554	0,559
8	0,399	0,418	0,463	0,452
4	0,430	0,443	0,489	0,478
2	0,460	0,459	0,502	0,494
1	0,489	0,469	0,508	0,504

Sumber: Olahan Penelitian

Dilihat dari gambar 6 nilai indeks kompresi terendah pada variasi campuran Silica fume 10% dengan nilai 31,21%, sedangkan nilai indeks kompresi tertinggi pada variasi campuran Silica fume 20% dengan nilai 33,22%.

Pembahasan hasil analisis nilai Cs Tanah Setelah Penambahan *Silica Fume*

Hasil pembahasan analisis nilai indeks pengembangan menjelaskan rekapitulasi data yang didapatkan dari pengujian konsolidasi dengan sampel tanah asli dan tanah asli ditambah Silica fume.

Tabel 7. Nilai e Indeks Kompresi Tanah Asli + *Silica Fume*

Tekanan kg/cm ²	Angka Pori (e)			
	Tanah Asli	TA + SF %%	TA + SF 10%	TA + SF 20%
0,25	0,879	0,766	0,779	0,792
0,5	0,844	0,752	0,769	0,783
1	0,766	0,709	0,728	0,735
2	0,667	0,617	0,647	0,659
4	0,558	0,520	0,554	0,559
8	0,399	0,418	0,463	0,452
4	0,430	0,443	0,489	0,478
2	0,460	0,459	0,502	0,494
1	0,489	0,469	0,508	0,504

Sumber : Olahan Penelitian

Nilai indeks pengembangan terendah pada variasi campuran Silica fume 10% dengan nilai 4,36%, sedangkan nilai indeks kompresi tertinggi pada variasi campuran Silica fume 20% dengan nilai 5,42%. Untuk indeks pengembangan juga bisa dinyatakan variasi campuran Silica fume 10% lebih efektif untuk mengurangi nilai indeks pengembangani tanah lempung ekspansif.

KESIMPULAN

Dari analisis data dan sudah dilakukan pembahasan analisis data, maka dapat disimpulkan sebagai berikut: 1) Berdasarkan pengujian konsolidasi didapat nilai indeks kompresi (Cc) pada variasi campuran Silica fume 0% sebesar 36,17%, variasi 5% sebesar 32,00%, variasi 10% sebesar 31,21%, dan variasi campuran 20% sebesar 33,22%. Didapatkan nilai indeks kompresi paling rendah terjadi pada campuran 10% yaitu 31,21%. Nilai ini mengalami penurunan sebesar 13,73% dari nilai indeks kompresi tanah asli; 2) Berdasarkan pengujian konsolidasi didapat nilai indeks pengembangan (Cs) pada variasi campuran Silica fume 0% sebesar 9,87%, variasi 5% sebesar 5,17%, variasi 10% sebesar 4,36%, dan variasi campuran 20% sebesar 5,42%. didapatkan nilai indeks pengembangan paling rendah terjadi pada campuran 10% yaitu 4,36%. Nilai ini mengalami penurunan sebesar 55,78% dari nilai indeks pengembangan tanah asli.

DAFTAR REFERENSI

- Fauziek, M dan Suhendra, A. (2018). "Efek Dari Dynamic Compaction (Dc) Terhadap Peningkatan Kuat Geser Tanah," J. Mitra Teknik Sipil Vol.1, No.2, pp. 206, November. 2018
- Hardiyatmo, H.C. (1992). Mekanika Tanah I. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta
- Julianto, Agil dkk. (2021). Pengujian Permeabilitas Tanah Yang Dipadatkan Dengan Metode Modified Proctor Cubic Permeameter. Universitas Lampung. Lampung

- Ilham, A. (2005). Pengaruh Sifat-Sifat Fisik Dan Kimia Bahan Pozolan Pada Beton Kinerja Tinggi. Univ Islam Indonesia. Yogyakarta
- Sufa, Isye F. dan Jihade, Kufiita A. (2021). *Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Penambahan Bahan Silica Fume Dan Limbah Gypsum*. Universitas Islam Sultan Agung. Semarang..