

**PERUBAHAN STABILITAS TANAH AKIBAT PENAMBAHAN KAPUR, SEMEN,
DAN FLY ASH PADA TANAH LUNAK PROYEK TOL GEMPOL-PASURUAN**
*(The Changes of Soil Stability Due to Addition of Lime, Cement, and Fly ash on Soft Soil in
Project of Gempol-Pasuruan Toll Road)*

Wahid Darmawan, Arief Rachmansyah, Yulvi Zaika
Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan Mayjen Haryono 167, Malang 65145, Indonesia
Email : wahiddarmawan@gmail.com

ABSTRAK

Jalan tol Gempol - Pasuruan merupakan jalan tol yang menghubungkan daerah Gempol, Sidoarjo dengan Kota Pasuruan. Seperti yang telah diketahui bahwa tanah di daerah tersebut bersifat kohesif, sehingga dapat menyebabkan kondisi tanah menjadi tidak stabil. Perlu dilakukan pengujian sifat fisik dan sifat mekanik tanah untuk mengetahui karakteristik tanah. Dilakukan pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*), uji triaksial (*Triaxial Test*), dan uji Konsolidasi (*Consolidation Test*) untuk mengetahui nilai stabilitas kadar zat aditif yang bervariasi, untuk kapur yaitu sebesar 3%; 6%; 9%; 12%; dan 15%, untuk semen sebesar 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%, dan untuk fly ash sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Hasil dari penelitian uji kuat tekan bebas (*unconfined compression test*) didapatkan semakin besar kadar aditif nilai q_u , dan C_u semakin besar. Untuk sudut geser (ϕ) yang diuji dengan uji triaksial (*triaxial test*) didapatkan semakin besar kadar aditif maka sudut geser (ϕ) semakin besar dan grafik nilai kohesi (c) berbanding terbalik terhadap nilai sudut geser (ϕ). Dari hasil pengujian konsolidasi (*consolidation test*) adalah semakin besar nilai koefisien konsolidasi maka semakin besar pula nilai penurunan tanah.

Kata kunci: tanah lunak, *fly ash*, kapur, semen, kuat geser, konsolidasi.

ABSTRACT

Gempol - Pasuruan toll road is connecting Gempol, Sidoarjo with Pasuruan City. As it is known that the soil in those area is cohesive, so it caused the soil conditions became unstable. Needs to testing physical and mechanical properties of the soil to find out the soils characteristics. Unconfined Compression Test, Triaxial test, and Consolidation Test were performed to determine the value of stability of various additives, for lime, 3%; 6%; 9%; 12%; and 15%, for cement by 5%, 8%, 10%, 12%, and 15%, and for fly ash by 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%. The result of unconfined compression test showed that the additive value of q_u , and C_u , were higher. For the shear angle (ϕ) tested by triaxial test, the greater additive degree the shear angle (ϕ) is greater and the cohesion value graph (c) is inversely proportional to the shear angle value (ϕ). From the consolidation test results is the greater value of the coefficient consolidation the greater the value of soil consolidation.

Keywords: soft soil, fly ash, lime, cement, shear strength, consolidation.

1. PENDAHULUAN

Tanah di Jalan Tol Gempol - Pasuruan memiliki jenis tanah kohesif dan konsistensi tanah yang tidak stabil akibat kandungan air tanah berlebih. Variasi kadar air dalam tanah akan terus terjadi sepanjang tahun, seiring dengan pergantian musim. Keadaan tanah dan variasi kadar air yang terjadi seperti ini tentunya kurang baik dalam menerima beban bangunan sehingga perlu dilakukan stabilisasi agar keadaan tanah dapat lebih stabil.

Untuk mengetahui besarnya nilai stabilitas yang terjadi pada tanah yang bersifat kohesif, dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya, uji pemadatan, uji konsolidasi, uji triaksial, dan uji kuat tekan bebas. Dengan berbagai macam persentase pencampuran kadar additif maka pengaruh pada nilai stabilitas tanah. Stabilisasi tanah merupakan usaha untuk memperbaiki sifat dasar tanah yang berguna meningkatkan daya dukung tanah atau mutu tanah agar tidak membahayakan dalam pembangunan konstruksi.

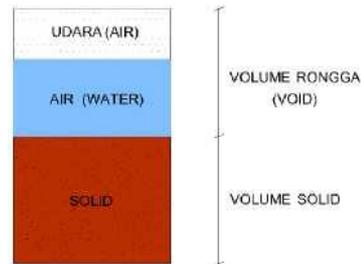
Dalam penelitian ini digunakan variasi kadar additif untuk kapur yaitu sebesar 3%; 6%; 9%; 12%; dan 15%, untuk semen sebesar 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%, dan untuk fly ash sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.

2. DASAR TEORI

2.1 Pengertian Tanah

Tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral- mineral padat yang tidak bersegmentasi (terikat secara kimia) satu sama lain, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan bahan-bahan organik (yang berpartikel padat) (Herlien, 2008).

Tanah terdiri dari tiga komponen yaitu udara, air dan bahan padat. Udara dianggap tak mempunyai pengaruh teknis sedangkan air sangat mempengaruhi sifat-sifat teknis tanah. Ruang di antara butiran-butiran (ruang ini disebut pori atau voids) sebagian atau seluruhnya dapat terisi oleh air atau udara. Bila rongga tersebut terisi air seluruhnya tanah dikatakan dalam kondisi jenuh.



Gambar 1. Diagram Fase Tanah Sumber : Das (1995)

2.2 Tanah Lempung

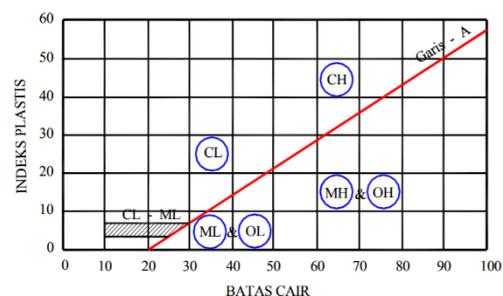
Tanah lempung merupakan tanah yang bersifat *multi component* yang terdiri dari tiga fase yaitu padat, cair, dan udara. Bagian yang padat merupakan polymorphous terdiri dari mineral inorganic dan organis. Mineral lempung merupakan substansi kristal yang sangat tipis yang pembentukan utamanya berasal dari perubahan kimia pada pembentukan mineral - mineral batuan dasar. Tiga jenis mineral lempung utama yang sudah dikenal yaitu *kaolinite*, *illite*, *montmorillonite*

2.3 Penelitian Sifat Fisik Tanah

a. Sistem Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat serupa kedalam kelompok dan subkelompok pemakaiannya. Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan adalah *Unified Soil Classification System (USCS)* dan *American Asiciation of Stage Highway and Transportation Official Classification (AASHTO)*.

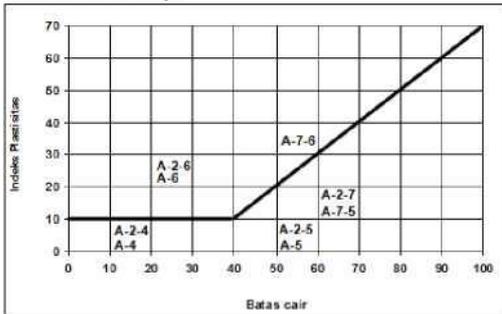
Gambar 2. Grafik Plastisitas, sistem USCS



Sumber : Das (1995)

Klasifikasi Umum	Material Berbutir Kasar (35% atau kurang lolos saringan No. 200)						Material Lanau -Lempung (lebih dari 35% lolos saringan No. 200)				
	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
Klasifikasi Group	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7		A-5	A-6	A-7-5 A-7-6
Analisa Tapir; persen lolos:											
No. 10	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 40	30 max	50 max	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Karakteristik fraksi lolos saringan No. 40:											
Batas Cair	-			40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks Plastisitas	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
Jenis Material Pokok	Fragmen batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan Pasir Kelampayan atau kelampayan				Tanah lanau		Tanah lempung	
Tingkat Kegunaan sebagai Subgrade	Sangat baik hingga baik						Cukup baik hingga buruk				

* Indeks Plastisitas untuk sub group A-7-5 sama dengan atau kurang dari batas cair dikurang 30. Indeks Plastisitas untuk sub group A-7-6 lebih besar dari batas cair dikurang 30.



Gambar 3 Klasifikasi tanah sistem AASHTO
Sumber : Das (1995)

b. Uji Konsolidasi (*Consolidation Test*)

Konsolidasi merupakan suatu proses pemampatan tanah, dan berkurangnya volume pori dalam tanah. Proses ini biasanya memakan waktu yang cukup lama dari tahunan bahkan sampai puluhan tahun. Konsolidasi terbagi menjadi 2 yaitu *Immediate Settlement* dan *consolidation settlement*. Parameter-parameter konsolidasi suatu tanah yaitu indeks kompresi (C_c) dan koefisien konsolidasi (C_v).

c. Uji Triaksial (*Triaxial Test*)

Percobaan triaxial merupakan metode yang paling umum untuk mencari kekuatan geser tanah. Percobaan triaxial dilakukan dengan cara benda uji dimasukkan dalam selubung tipis dan diletakkan dalam tabung baja, kemudian riang di dalam tabung diisi dengan air.

Dengan (c) dan (ϕ) pada titik keruntuhan yang telah diketahui, maka dapat digambar suatu lingkaran *Mohr*. Lingkaran - lingkaran ini harus memiliki suatu garis singgung yang dikenal dengan sampul *Mohr* dan merupakan suatu garis yang sama dengan persamaan garis yang diberikan oleh percobaan *Coulomb*, sehingga dapat diketahui nilai c dan ϕ .

d. Uji *Unconfined Compression Strength*

Uji kuat tekan bebas merupakan uji kekuatan tanah dengan tekanan satu arah. Kuat tekan bebas (q_u) adalah besarnya beban aksial persatuan luas pada saat benda uji mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial mencapai 15%.

e. *Shallow Soil Mix (SSM)*

Shallow Soil Mix merupakan metode pencampuran bahan aditif dengan tanah kondisi asli pada permukaannya saja, biasanya metode ini digunakan hanya untuk kedalaman maksimum yaitu 10 m. Pada metode SSM ini digunakan *backhoe* besar dengan lengan ayun yang panjang dengan perangkat hidrolik dinamis yang digunakan untuk proses pencampuran bahan aditif pada bagian ujung lengan ayun.

Proses pencampuran bahan aditif pada metode SSM ini diawali dengan pembuatan kolam dengan menggunakan *backhoe* sesuai dengan dimensi yang direncanakan, kemudian dilanjutkan dengan pencampuran kolam tanah sesuai dengan bahan aditif yang akan digunakan dengan menggunakan *backhoe custom* yang dilengkapi dengan auger untuk alat pencampur dan nozel injeksi untuk menyuntikkan bahan campuran pada tanah.

f. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu, guna memperbaiki sifat-sifat teknis tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu. Proses stabilisasi tanah meliputi pencampuran tanah dengan tanah lain untuk memperoleh gradasi yang diinginkan, atau pencampuran tanah dengan bahan-tambah buatan pabrik, sehingga sifat-sifat teknis tanah menjadi lebih baik.

Sifat-sifat teknis tanah tersebut dapat berupa kapasitas dukung, kompresibilitas, permeabilitas, kemudahan dikerjakan, potensi pengembangan, dan sensifitas terhadap perubahan kadar air, maka dapat dilakukan dengan cara penanganan dari yang paling mudah, seperti pemadatan sampai teknik yang lebih mahal.

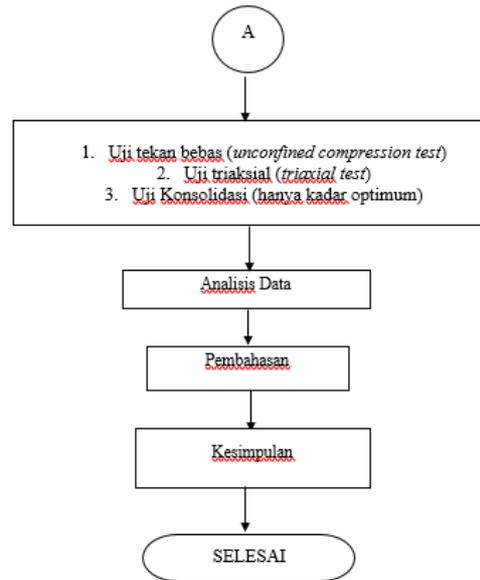
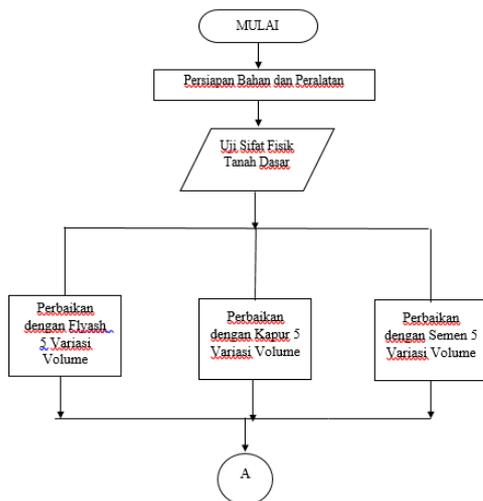
3. METODE PENELITIAN

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah lunak yang berasal dari Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur STA 31+.

Tanah tersebut diuji untuk mengetahui karakteristik tanah asli dengan menggunakan uji kadar air, *specific gravity*, *density test*, analisa saringan, hidrometer, batas konsistensi, *falling head*, konsolidasi, triaksial, dan *unconfined*. Selain itu juga dilakukan pengujian pemadatan tanah untuk mengetahui kadar air optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (γ_d maks) tanah yang selanjutnya OMC dan berat isi kering maksimum (γ_d maks) tersebut akan digunakan sebagai variabel terikat (pengontrol) pada pembuatan sampel dengan variasi kadar additif yang bervariasi mengacu pada penelitian sebelumnya.

Dilakukan pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*), uji triaksial (*Triaxial Test*), dan uji Konsolidasi (*Consolidation Test*) untuk mengetahui nilai stabilitas kadar zat additif yang bervariasi, untuk kapur yaitu sebesar 3%; 6%; 9%; 12%; dan 15%, untuk semen sebesar 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%, dan untuk fly ash sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.

Langkah - langkah dalam melakukan penelitian dapat dilihat pada diagram alir pada gambar berikut:



Gambar 4. Diagram alir tahapan penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

a. Pembacaan Data SPT

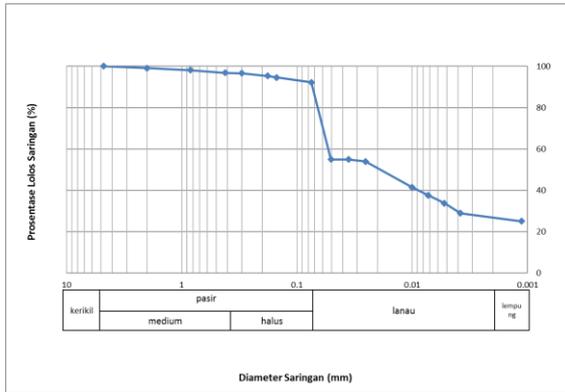
Uji yang dilakukan dengan cara pengeboran untuk mengetahui baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan. Dari pengujian SPT, dapat diketahui jenis tanah yang sedang diuji dengan menggunakan tabel seperti pada **tabel 1**.

Consistency	N	c_u (kN/m ²)
Very soft	0–2	<12
Soft	2–4	12–25
Medium	4–8	25–50
Stiff	8–15	50–100
Very stiff	15–30	100–200
Hard	>30	>200

Tabel 1. Pengelompokan jenis tanah berdasarkan hasil SPT

Dari pengujian *Standart Penetration Test* (SPT) yang dilakukan oleh pihak Adhi Karya seperti pada lampiran 5, didapatkan nilai NSPT dengan rentang 1-9 yang apabila dihubungkan dengan tabel penentuan jenis tanah menurut data SPT, maka didapatkan hasil bahwa tanah termasuk ke dalam jenis tanah lunak. Tanah lunak ditemukan pada kedalaman 1 sampai 15,5 m.

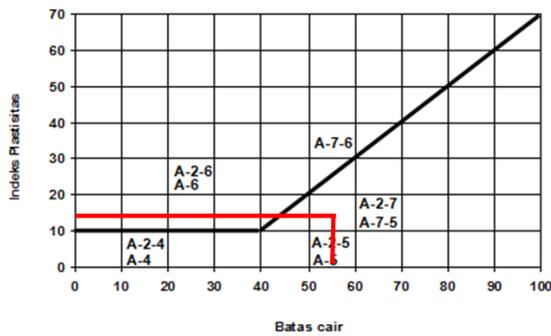
b. Uji Analisis Butiran



Gambar 5. Analisis saringan dan hidrometer

Dari gambar 5 di atas dapat dilihat bahwa tanah dari Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan ini memiliki persentase distribusi lolos saringan no. 200 sebesar 92,15% dan menurut sistem klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System (USCS)* termasuk jenis tanah berbutir halus MH atau OH. Sedangkan menurut klasifikasi AASHTO, tanah termasuk ke dalam tanah berlempung grup A-7-5.

c. Sistem Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO



Gambar 6. Sistem Kualifikasi Tanah AASHTO

Karena indeks plastitas tanah asli adalah 12.76% maka perlu dilakukan perbaikan hal itu ada pada petunjuk perencanaan tebal perkerasan lentur jalan raya dengan metode analisa komponen dari departemen pekerjaan umum Republik Indonesia. Maka dari itu perbaikan yang akan dilakukan adalah pencampuran dengan zat aditif, dan zat aditif yang mudah didapat dan efektif dipakai untuk stabilisasi untuk tanah tersebut adalah *flyash*, semen, dan kapur.

Hasil yang baik dalam stabilisasi semen adalah bila tanah asli bergradasi baik dan mempunyai butiran halus kurang dari 50%,

serta indeks plastisitas (*PI*) kurang dari 18%, dan batas cair (*LL*) kurang dari 40% (HRBA,1943). Untuk kapur dan *flyash* berdasarkan tabel dari Ingles dan Metcalf, 1972 cocok untuk jenis tanah lunak lempung.

d. Uji Pemadatan

Pengujian pemadatan standar dilakukan untuk mengetahui nilai kadar air optimum dan berat isi kering maksimum dari sampel tanah benda uji. Uji pemadatan dilakukan dengan cara mekanis atau ditumbuk menggunakan *proctor* standart dengan proses dimana udara pada pori-pori dikeluarkan. Pemadatan standar dilakukan terhadap benda uji tanah lunak dan menggunakan campuran zat aditif dengan masing-masing prosentase 3%; 6%; 9%; 12%; 15% untuk kapur, 5%, 8%, 10%, 12%, 15% untuk semen dan 5%; 10%; 15%; 20%; 25% untuk fly ash dari berat total campuran. Nilai dari kadar air optimum dan berat isi kering maksimum dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Komposisi Tanah	Kadar Air Optimum (%)	Berat Isi Kering Maksimum (gr/cm ³)	Peneliti
Tanah asli	31.25	1.25	Arinda dan Zaika
Tanah asli + 3% Kapur	31.90	1.33	Reza dan Zaika
Tanah asli + 6% Kapur	28.10	1.386	Reza dan Zaika
Tanah asli + 9% Kapur	30.18	1.30	Reza dan Zaika
Tanah asli + 12% Kapur	30.44	1.335	Reza dan Zaika
Tanah asli + 15% Kapur	28.75	1.336	Reza dan Zaika
Tanah asli + 5% Semen	26.10	1.43	Adista dan Zaika
Tanah asli + 8% Semen	26.60	1.395	Adista dan Zaika
Tanah asli + 10% Semen	22.01	1.434	Adista dan Zaika
Tanah asli + 12% Semen	23.50	1.456	Adista dan Zaika
Tanah asli + 15% Semen	21.92	1.447	Adista dan Zaika
Tanah asli + 5% Fly Ash	25.70	1.47	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 10% Fly Ash	25.90	1.48	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 15% Fly Ash	25.80	1.49	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 20% Fly Ash	25.40	1.50	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 25% Fly Ash	25.90	1.49	Fathur dan Zaika

Sumber: Arinda, Reza, Adista, Fathur, dan Zaika (2018)

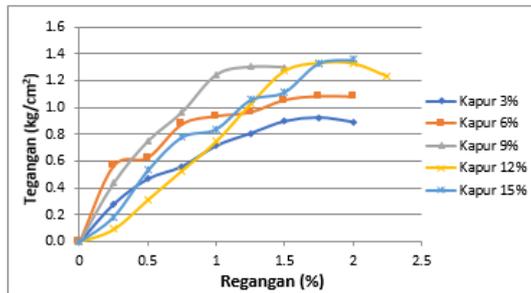
Tabel 2. Hasil uji pemadatan dan kadar air optimum

4.2 Analisis Hasil Pengujian Lanjutan

Pengujian lanjutan dilakukan untuk mengetahui nilai stabilitas tanah dengan melakukan Uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*), Uji Triaksial (*Triaxial Unconsolidated Undrained*) dengan kadar air optimum dan variasi kadar zat aditif. Serta Uji Konsolidasi dengan kadar air dan kadar zat aditif optimum saja.

4.2.1 Pengujian Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compression Test)

a. Campuran Tanah dan Kapur

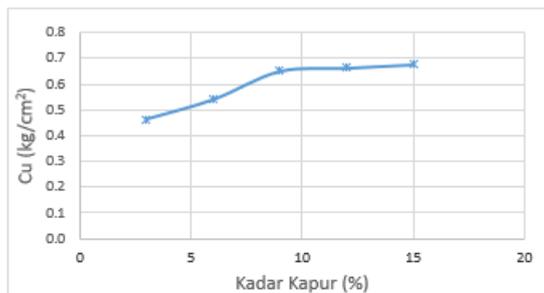


Gambar 7. Perbandingan tegangan-regangan dengan variasi kadar kapur

Hasil pengujian kuat tekan bebas dari **Gambar 7** menunjukkan bahwa nilai tegangan akhir saat runtuh dari tanah lunak campuran kapur berbanding lurus dengan dengan variasi kadar. Semakin banyak kadar yang diberi maka tanah tersebut semakin memiliki tegangan saat runtuh (q_u) yang lebih besar.

No.	Kadar kapur (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)
1	3	0.926	0.463
2	6	1.080	0.540
3	9	1.303	0.651
4	12	1.327	0.664
5	15	1.354	0.677

Tabel 3. Perbandingan q_u dan Cu variasi kadar kapur

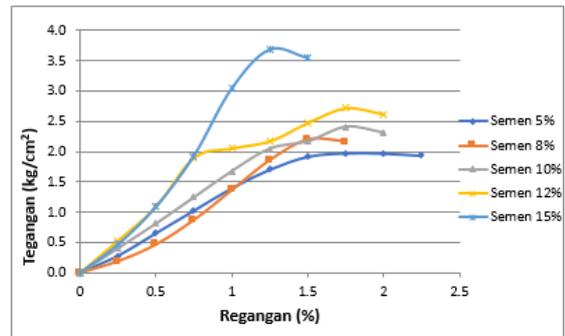


Gambar 8. Pengaruh kadar kapur terhadap Cu

Pengaruh kadar kapur dari **Gambar 8** diatas dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar zat additif kapur maka nilai Cu semakin meningkat. Hal ini terjadi karena sifat kapur apabila dicampur dengan tanah akan mengakibatkan berkelimpahannya ion-ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} ion-ion ini cenderung menggantikan kation-kation seperti sodium (Na^+) dan Potasium (K^+) hal ini menyebabkan indeks plastisitas pada tanah mereduksi secara signifikan. Serta reaksi pozzolanic tanah-kapur

akan menghasilkan penambahan kekuatan campuran terhadap tanah yang akan memadatkan dan keawetan pada tanah itu sendiri. Dari table dan grafik diatas dapat diketahui juga kenaikan nilai Cu terbesar terjadi saat kadar kapur 6% yaitu sebesar 20.5%.

b. Campuran Tanah dan Semen

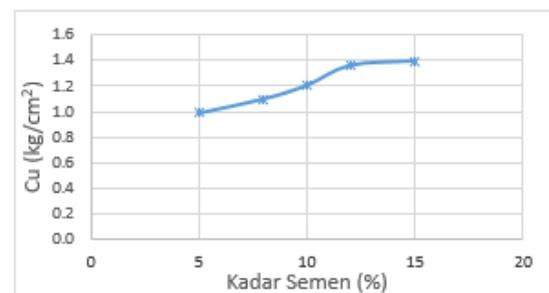


Gambar 9. Perbandingan tegangan-regangan dengan variasi kadar semen

Hasil pengujian kuat tekan bebas dari **Gambar 9** menunjukkan bahwa nilai tegangan saat runtuh dari tanah lunak campuran semen berbanding lurus dengan dengan variasi kadar. Semakin banyak kadar yang diberi maka tanah tersebut semakin memiliki tegangan saat runtuh (q_u) yang lebih besar.

No.	Kadar semen (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)
1	5	1.975	0.988
2	8	2.197	1.098
3	10	2.407	1.204
4	12	2.716	1.358
5	15	2.785	1.392

Tabel 4. Perbandingan q_u dan Cu variasi kadar semen



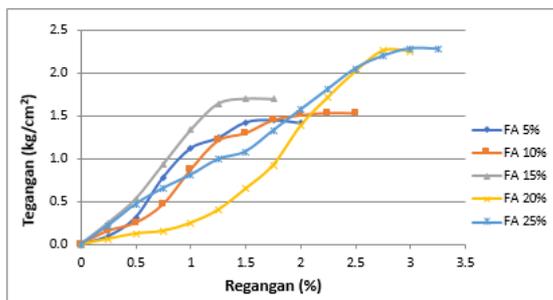
Gambar 10. Pengaruh kadar semen terhadap Cu

Pengaruh kadar semen dari **Gambar 10** dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar semen maka nilai Cu semakin meningkat. Hal ini terjadi karena hidrasi semen membuat campuran tanah dan semen menjadi material yang keras yang menyebabkan meningkatnya

daya dukung serta kekakuan dari tanah asli itu sendiri. Semen juga bereaksi dengan silika tanah untuk mengikat partikel partikel tanah disekitarnya hal ini yang menyebabkan semen memiliki nilai tegangan runtuh yang lebih besar dari kapur dan *flyash* pada tanah lempung berlanau ini. Dari tabel dan grafik diatas dapat diketahui juga kenaikan nilai Cu terbesar terjadi saat kadar semen 10% yaitu sebesar 15%.

c. Campuran Tanah dan Fly ash

Pengujian tanah dengan *fly ash* dilakukan karena *fly ash* merupakan limbah pembakaran batubara yang masih bisa dimanfaatkan salah satunya sebagai bahan untuk stabilisasi tanah. Adapun variasi kadar *fly ash* yang sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 5%, 10%, 15%, 15%, dan 25%. Hasil perbandingan tegangan dan regangan tanah dengan variasi kadar *fly ash* dapat dilihat pada **Gambar 11**.

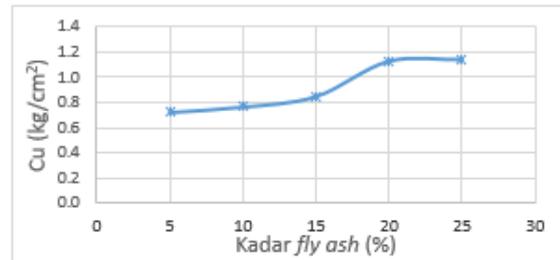


Gambar 11. Perbandingan tegangan-regangan dengan variasi kadar *fly ash*

Hasil pengujian kuat tekan bebas menunjukkan bahwa nilai tegangan saat runtuh dari tanah lunak berbanding lurus dengan dengan variasi kadar *fly ash*. Semakin banyak kadar *fly ash* yang diberi maka tanah tersebut semakin memiliki tegangan runtuh (q_u) yang lebih besar. Untuk nilai q_u dan Cu yang didapat dari percobaan tersebut dijelaskan pada Tabel dan Gambar berikut.

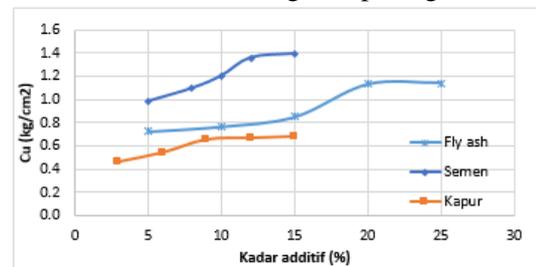
No.	Kadar <i>fly-ash</i> (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	Cu (kg/cm ²)
1	5	1.450	0.725
2	10	1.535	0.768
3	15	1.702	0.851
4	20	2.260	1.130
5	25	2.285	1.143

Tabel 5. Perbandingan q_u dan Cu variasi kadar *fly ash*



Gambar 12. Pengaruh kadar *fly ash* terhadap Cu

Pengaruh kadar *fly ash* dari **Gambar 12** dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar *fly ash* maka nilai Cu semakin meningkat. Dari tabel dan grafik diatas dapat diketahui juga kenaikan nilai Cu terbesar terjadi saat kadar *fly ash* 15% yaitu sebesar 32%. Hasil percobaan Kuat Tekan bebas dirangkum pada gambar 4.



Gambar 13. Rangkuman hasil Cu uji kuat tekan bebas

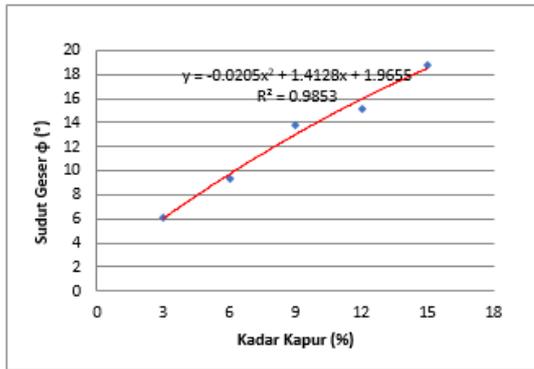
4.2.2 Pengujian Triaksial-UU (*Triaxial Unconsolidated Undrained*)

a. Campuran Tanah dan Kapur

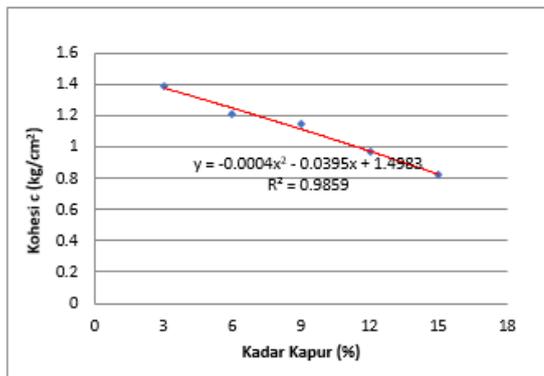
Benda uji yang diujikan untuk uji triaksial ini sama dengan benda uji *unconfined* yaitu benda uji tanah asli yang dicampur dengan berbagai variasi kadar kapur. Variasi kadar kapur sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Hasil perbandingan sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar kapur dapat dilihat pada:

No	Kadar Kapur (%)	Φ (°)	c (kg/cm ²)
1	3	6.041	1.390
2	6	9.383	1.210
3	9	13.844	1.146
4	12	15.177	0.967
5	15	18.789	0.822

Tabel 6. Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan kapur



Gambar 14. Grafik kadar kapur terhadap sudut geser (Φ)



Gambar 15. Grafik kadar kapur terhadap nilai kohesi (c)

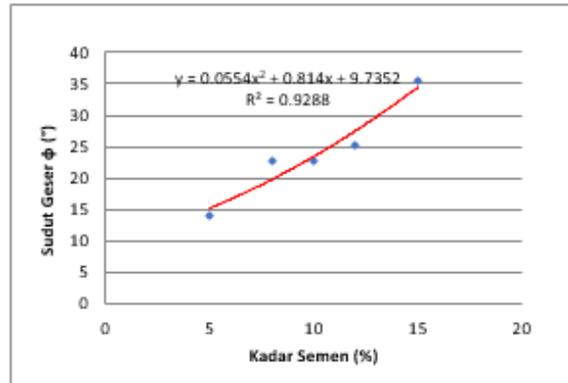
Sudut geser untuk tanah dengan campuran kadar kapur 3% memiliki nilai yang paling rendah yaitu $6,041^\circ$. Peningkatan sudut geser juga terlihat pada **Gambar 14** secara signifikan hingga tertinggi pada tanah dengan campuran kadar kapur 15% yaitu sebesar $18,789^\circ$. Dapat dilihat pada **Gambar 15**, nilai kohesi (c) maksimum berada pada kadar kapur sebesar 3% dengan nilai kohesi 1,39. Nilai kohesi terjadi penurunan seiring bertambahnya kadar kapur.

b. Campuran Tanah dan Semen

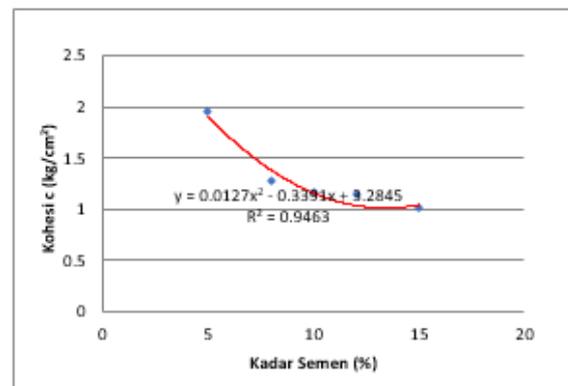
Sampel yang diujikan untuk uji triaksial yaitu benda uji tanah asli yang dicampur dengan variasi kadar semen. Variasi kadar semen sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%. Hasil perbandingan sudut geser (Φ) dan kohesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar semen dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut:

No	Kadar Semen (%)	Kadar air (%)	Φ ($^\circ$)	c (kg/cm ²)
1	5	26.10	14.085	1.951
2	8	26.60	22.775	1.265
3	10	22.01	22.820	1.164
4	12	23.50	25.219	1.147
5	15	21.92	35.411	1.000

Tabel 7. Hasil sudut geser (Φ) dan kohesi (c) dengan semen



Gambar 16. Grafik kadar semen terhadap sudut geser (Φ)



Gambar 17. Grafik kadar semen terhadap nilai kohesi (c)

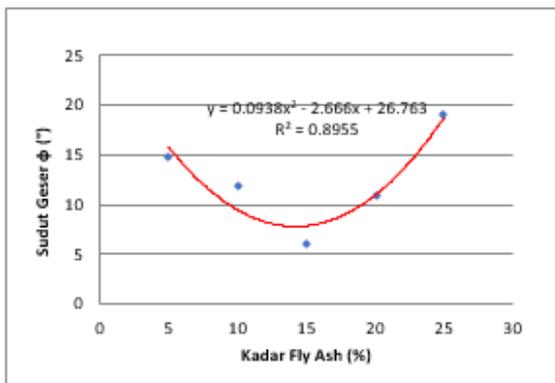
Sudut geser untuk tanah dengan campuran kadar semen 5% memiliki nilai yang paling rendah yaitu $14,085^\circ$. Peningkatan sudut geser (Φ) juga terlihat pada **Gambar 16** secara signifikan hingga tertinggi pada tanah dengan campuran kadar semen 15% yaitu sebesar $35,411^\circ$. Dapat dilihat pada **Gambar 17**, nilai kohesi (c) maksimum berada pada kadar semen sebesar 5% dengan nilai kohesi 1,951. Nilai kohesi terjadi penurunan seiring bertambahnya kadar semen.

c. Campuran Tanah dan fly ash

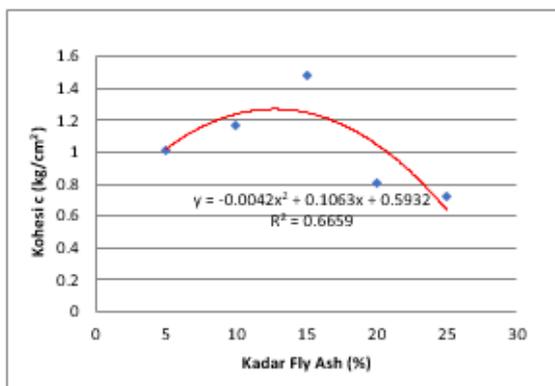
Sampel yang diujikan untuk uji triaksial yaitu benda uji tanah asli yang dicampur dengan variasi kadar fly ash. Variasi kadar fly ash sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Hasil perbandingan sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar semen dapat dilihat pada tabel dan gambar berikut:

No	Kadar Fly Ash (%)	ϕ (°)	c (kg/cm ²)
1	5%	14.859	1.017
2	10%	11.877	1.169
3	15%	6.174	1.479
4	20%	10.803	0.808
5	25%	19.062	0.720

Tabel 8. Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan fly ash



Gambar 18. Grafik kadar fly ash terhadap sudut geser (Φ)



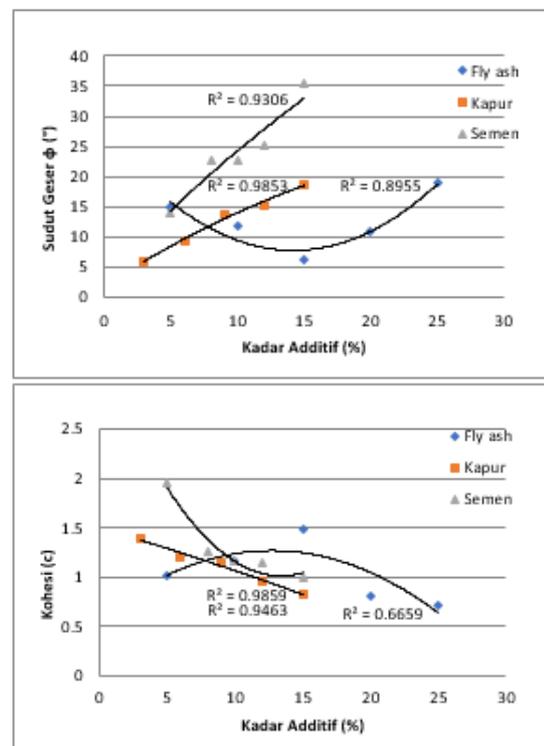
Gambar 19. Grafik kadar fly ash terhadap nilai kohesi (c)

Dapat dilihat bahwa bentuk grafik dari sudut geser (Φ) dan grafik nilai kohesi (c) dari campuran tanah dengan fly ash adalah fluktuatif. Sudut geser untuk tanah dengan campuran kadar fly ash 15% memiliki nilai yang paling rendah yaitu 6,174°. Sudut geser

(Φ) tertinggi pada tanah dengan campuran kadar fly ash 25% yaitu sebesar 19,062°. Dapat dilihat pada **Gambar 19**, nilai kohesi (c) maksimum atau puncak berada pada kadar fly ash sebesar 15% dengan nilai kohesi 1,479.

Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel yang sejenis, kohesi dipengaruhi oleh kerapatan dan jarak antarpartikel dalam tanah. Untuk keadaan tanah campuran fly ash yaitu kadar 15% memiliki nilai kohesi yang paling tinggi dikarenakan gaya tarik menarik antar partikel tinggi, dalam keadaan kadar fly ash optimum ini tanah memiliki kerapatan atau kepadatan yang paling maksimum dibanding kadar yang lain. Pada tanah campuran dengan kadar fly ash 20% dan 25% nilai kohesi kembali terjadi penurunan. Penurunan nilai kohesi ini disebabkan oleh adanya pergerakan partikel-partikel tanah yang saling menjauhi satu sama lain akibat dari pori-pori tanah terisi terlalu banyak air sehingga terjadi pelemahan ikatan antar partikel dalam tanah.

Hasil percobaan *Triaxial Unconsolidated Undrained* dengan output nilai sudut geser Φ dan nilai kohesi (c) data dirangkum dalam grafik dibawah ini pada gambar berikut:



Gambar 20. Rangkuman uji triaksial

4.2.3 Pengujian Konsolidasi

Pemeriksaan konsolidasi bertujuan untuk menentukan sifat pemadatan suatu jenis tanah karena proses keluarnya air dari pori tanah yg diakibatkan oleh adanya tekanan vertikal yang bekerja pada tanah. Selain itu, penelitian konsolidasi juga bertujuan untuk mengetahui parameter konsolidasi suatu tanah yaitu Indeks Kompresi (C_c) dan Koefisien Konsolidasi (C_v).

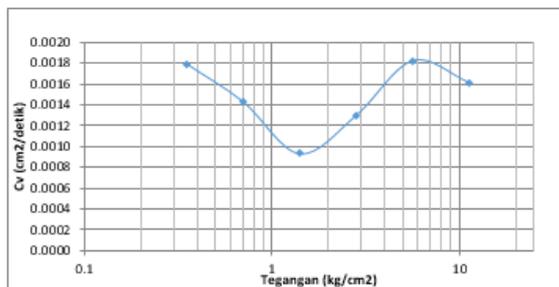
Ketentuan campuran zat additif berdasarkan pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*) dengan nilai tegangan maksimum runtuh (q_u) dan nilai C_u yang paling besar kenaikannya ditetapkan kadar 6% untuk kapur, 10% untuk semen, dan 15% untuk *fly ash* dari berat total campuran.

a. Konsolidasi campuran tanah dan kapur

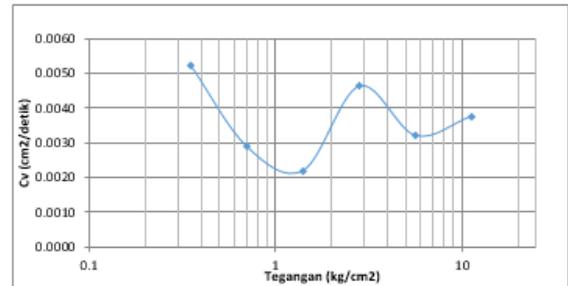
Benda uji yang digunakan untuk uji konsolidasi dengan kapur sesuai dengan ketetapan standar konsol yaitu berukuran diameter 6 cm dan tinggi 1 cm. Untuk kadar yang digunakan sesuai dengan hasil uji kuat tekan bebas yang menghasilkan nilai C_u yang besar kadar kenaikannya untuk kadar kapur yaitu dengan kadar 6% dengan nilai C_u 0,540 dengan kenaikan sebesar 20.5%. Hasil pengujian konsolidasi dengan campuran tanah dengan kapur dengan kadar 6% dapat dilihat sebagai berikut:

Tegangan (kg/cm ²)	C_v (t90)	C_v (t50)
0,354	0,00523	0,00179
0,707	0,00288	0,00143
1,415	0,00219	0,00093
2,829	0,00464	0,00130
5,659	0,00321	0,00182
11,318	0,00377	0,00161

Tabel 9. Tabel koefisien konsolidasi kapur



Gambar 21. Hubungan tegangan dan C_v (t50)

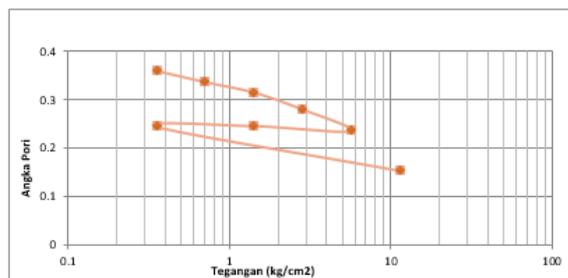


Gambar 22. Hubungan tegangan dan C_v (t90)

Koefisien konsolidasi (C_v) merupakan parameter yang menghubungkan perubahan tekanan air pori terhadap waktu. Koefisien konsolidasi berhubungan dengan berapa lama suatu konsolidasi tanah tertentu akan terjadi dan juga tingkat penurunan yang akan terjadi untuk masa yang akan datang. Hasil nilai koefisien konsolidasi (C_v) ditabelkan pada tabel 10.

Tegangan (kg/cm ²)	Konsolidasi ΔH (cm)	Angka Pori $e = e_0 - \Delta e$
0,000	0,000	0,452
0,354	0,063	0,361
0,707	0,079	0,338
1,415	0,094	0,316
2,829	0,118	0,281
5,659	0,148	0,237
1,415	0,141	0,247
0,354	0,142	0,246
11,318	0,205	0,155

Tabel 10. Besarnya konsolidasi dan angka pori



Gambar 23. Hubungan antara tegangan dan angka pori

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} & C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} & &= \frac{e_4 - e_5}{\log \frac{\sigma_5}{\sigma_4}} \\
 &= \frac{0.338 - 0.316}{\log \frac{2.829}{1.415}} & &= \frac{0.316 - 0.281}{\log \frac{5.659}{2.829}} \\
 &= 0,073 & &= 0,116
 \end{aligned}$$

Indeks Kompresi (C_c) berhubungan dengan berapa besarnya penurunan yang akan terjadi. Dari perhitungan didapatkan nilai C_c rata – rata sebesar 0,0945, yang menurut tabel nilai C_c untuk macam – macam jenis tanah menunjukkan bahwa tanah termasuk ke dalam jenis tanah lempung kenyal.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat dihitung besarnya penurunan tanah yang terjadi sebagai berikut:

Indeks pemampatan, $C_c = 0,0945$

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

Asumsi beban kendaraan dan struktur, $\Delta\sigma' = 30 \text{ kN/m}^2$

Berat jenis tanah, $\gamma_{sat} = 12,472 \text{ kN/m}^3$

Void ratio sebelum pembebanan, $e_o = 0,452$

Tegangan efektif *overburden*, $\sigma_o' = (7,75) \times (12,472 - 10) = 19,158 \text{ kN/m}^2$

Sehingga diperoleh besarnya penurunan:

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{C_c \cdot H}{1+e_o} \log \left(\frac{\sigma_o' + \Delta\sigma'}{\sigma_o'} \right) \\ &= \frac{0,0945 \times 15,5}{1+0,452} \log \left(\frac{19,158+30}{19,158} \right) \\ &= 0,413 \text{ m} \end{aligned}$$

Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan konsolidasi sebesar 0,413 m juga dapat dihitung dengan analisa waktu 90% konsolidasi, sebagai berikut:

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

Panjang aliran drainase, $H_{dr} = 7,75 \text{ m}$

Koefisien konsolidasi, $C_v = 3,77 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$

Faktor waktu konsolidasi 90%, $t_{90} = 0,593$

$$\begin{aligned} t &= \frac{T_v \times H^2 \times dr}{C_v} \\ &= \frac{0,593 \times 7,75^2}{3,77 \times 10^{-7}} \\ &= 94474966,84 \text{ detik} \\ &= 94474966 / (3600 \times 24 \times 30) \\ &= 36,45 \text{ bulan} = 3,0375 \text{ tahun} \end{aligned}$$

Jadi, konsolidasi yang terjadi sebesar 0,413 m dalam waktu tempuh 3,0375 tahun. Apabila dibandingkan dengan konsolidasi tanah asli yang telah dilakukan oleh Putri dan Zaika (2018) didapat penurunan akibat konsolidasi sebesar 2,65 m dengan waktu tempuh selama 25,7 tahun maka, perbaikan tanah menggunakan kapur dapat mengurangi penurunan menjadi lebih kecil serta mempersingkat waktu konsolidasi tersebut.

Hasil dari percobaan Uji Konsolidasi diatas dirangkum dalam Tabel berikut:

Jenis Sampel	C_c	C_v	Penurunan	
			S_c (m)	t (tahun)
Tanah asli	0.445	8.74×10^{-8}	2.65	25.7
Tanah asli + kapur 6%	0.0945	3.77×10^{-7}	0.413	3.0375
Tanah asli + semen 10%	0.080	4.75×10^{-7}	0.278	2
Tanah asli + fly ash 15%	0.767	0.13×10^{-6}	2.413	9.49

Tabel 11. Rangkuman Uji Konsolidasi

5. PENUTUP

a. Kesimpulan

1. Peningkatan nilai tegangan runtuh (q_u) terbesar terjadi pada tanah dengan kadar fly ash sebesar 15% dengan prosentase peningkatan 32%. Lalu untuk kadar kapur 6% dengan peningkatan sebesar 20%. Dan untuk tanah dengan kadar semen 10% dengan prosentase peningkatan 15%.
2. Semakin besar kadar zat additif pada tanah khususnya pada semen dan kapur, nilai sudut geser dalam (ϕ) tanah semakin besar. Namun pada *fly ash* nilai sudut gesernya berada pada titik terendah saat kadarnya optimum. Untuk nilai kohesi (c), nilai kohesi berkebalikan dengan grafik sudut geser dalam.
3. Penurunan terbesar terjadi pada tanah dengan campuran kadar *fly ash*, kemudian diikuti kapur, dan penurunan terkecil terjadi pada campuran tanah dengan kadar semen.

b. Saran

1. Perlu diadakan penelitian lanjutan dengan kadar yang lebih bervariasi untuk lebih akurat dalam hasilnya.
2. Perlu diadakan penelitian lanjutan dengan menggunakan benda uji dari jenis tanah yang berbeda selain tanah lempung.
3. Perlu diadakan perulangan dari setiap perlakuan agar hasil yang didapat lebih maksimal.
4. Perlu adanya peralatan praktikum yang lebih memadai, agar hasil dari penelitian lebih baik dan akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO, 1977., *Standard Fast for Material*, the Association General Offices, Washington D.C., USA.
- Annual Book of ASTM Standards*, 1997., Easton, MD, USA.
- Bowles, Joseph E. 1992. *Analisa dan Desain Pondasi Jilid I (Edisi Keempat)*. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, Joseph E. 1993. *Sifat – Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*. Jakarta: Erlangga.
- Craig, RF. 1991. *Mekanika Tanah Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.
- Coduto, Donald P., 1994, *Foundation Design Principles and Practise*, Prentice-Hall, Inc.
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Terjemahan oleh Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, H.C. 2012. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Indrawahyuni, Herlien. 2008. *Mekanika Tanah I*. Malang: Bargie Media.
- Mitchell, J.K., 1976, *Fundamental of Soil Behavior*, John Wiley and Sons. Inc, New York.
- Putri, Arinda Rahma Dianing, Yulvi Zaika dan Harimurti. 2018. *Jurnal Geoteknik: Pengaruh Kadar Air Terhadap Daya Dukung Pada Tanah Lunak di Jalan Tol Gempol – Pasuruan*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Rahmawati, Ika Meisy P. 2015. *Pengaruh Kadar Air terhadap Kuat Geser Tanah Ekspansif Bojonegoro dengan Stabilisasi Menggunakan 15% Fly Ash dengan Metode Deep Soil Mix*. Skripsi Program Studi Sarjana pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.