

**PERUBAHAN STABILITAS TANAH AKIBAT PENAMBAHAN
KAPUR, SEMEN, DAN *FLY ASH* PADA TANAH LUNAK PROYEK
TOL GEMPOL-PASURUAN**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**WAHID DARMAWAN
NIM. 1450601001111032**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**PERUBAHAN STABILITAS TANAH AKIBAT PENAMBAHAN
KAPUR, SEMEN, DAN *FLY ASH* PADA TANAH LUNAK PROYEK
TOL GEMPOL-PASURUAN**

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi sebagian
persyaratan memperoleh gelar Serjana Teknik



Disusun oleh:

WAHID DARMAWAN

NIM. 145060100111032

Skripsi ini telah dinyatakan lulus dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 20 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Ir. Arief Rachmansyah
NIP. 19660420 199303 1 002

Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT
NIP. 19680707 199403 2 002

Mengetahui
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Indradi W. ST., M.Eng (Prac)
NIP. 19810220 200604 1 002



HALAMAN IDENTITAS PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI :

PERUBAHAN STABILITAS TANAH AKIBAT PENAMBAHAN KAPUR, SEMEN,
DAN *FLY ASH* PADA TANAH LUNAK PROYEK TOL GEMPOL-PASURUAN

Nama Mahasiswa : Wahid Darmawan

NIM : 145060100111032

Program Studi : Teknik Sipil

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Harimurti, MT

Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Arief Rachmansyah

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT

Tanggal Ujian : 9 Juli 2018

SK Penguji : 1338/UN10.F07/SK/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah hasil pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

Mahasiswa,

Wahid Darmawan

NIM. 145060100111032



RIWAYAT HIDUP

Wahid Darmawan lahir 19 April 1996. Anak dari Bapak Sudjono dan Ibu Wiyana. Lulus SD di SD Al Hikmah Surabaya tahun 2008. Setelah itu lulus SMP di SMP Al Hikmah Surabaya tahun 2011. Selanjutnya lulus SMA di MAN 3 Malang tahun 2014. Kemudian melanjutkan studi di Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan lulus tahun 2018.

Malang, Juli 2018

Penulis





*Kupersembahkan untuk **Mu***



KATA PENGANTAR

Segala puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala anugerah-Nya dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“PERUBAHAN STABILITAS TANAH AKIBAT PENAMBAHAN KAPUR, SEMEN, DAN FLY ASH PADA TANAH LUNAK PROYEK TOL GEMPOL-PASURUAN”** dengan baik dan lancar. Skripsi ini merupakan persyaratan terakhir akademis yang telah ditetapkan untuk menyelesaikan tahap sarjana di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Tentunya saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar karena bantuan dari banyak pihak. Karena itu, kami ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
2. Bapak Dr. Eng Indradi W, ST, M.,Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Ibu Dr. Eng. Yulvi Zaika., MT dan Bapak Dr. Ir. Arief Rachmansyah selaku dosen pembimbing atas segala arahan, masukan, dan bimbingannya.
4. Bapak Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST, MT. selaku dosen pembimbing akademik.
5. Segenap dosen dan Karyawan di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Pak Ketut selaku staff Laboratorium Mekanika Tanah.
7. Keluarga yang telah memberikan semangat dukungan dan doa tanpa henti.
8. Teman-teman dalam tim Skripsi Stadium Akhir yang telah bekerja bersama-sama dalam mengerjakan skripsi dari awal hingga akhir.
9. Keluarga Besar Mahasiswa Sipil Universitas Brawijaya, khususnya teman-teman Teknik Sipil 2014 yang memberikan dukungan dan semangat selama penelitian ini berlangsung.
10. Dan semua pihak yang telah membantu kelancaran penulisan skripsi ini, yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

repository.ub.ac.id

Saya menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, saya berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, Juli 2018

Wahid Darmawan



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
RINGKASAN.....	xiii
SUMMARY	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Tujuan Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tanah Lempung.....	5
2.1.1 Mineral Lempung	6
2.1.2 Lempung Lunak.....	8
2.2 Klasifikasi Tanah Berdasarkan ASSHTO	11
2.3 Uji Laboratorium.....	13
2.3.1 Analisa Ukuran Butiran.....	13
2.3.2 Analisa Ayakan	13
2.3.3 <i>Specific Gravity</i>	14
2.3.4 Pemadatan.....	15
2.3.5 Uji Kuat Geser Tanah.....	15
2.3.6 Uji Kuat Tekan Bebas (<i>Unconfined Compression Test</i>)	16
2.3.7 Uji Triaksial (<i>Triaxial Test</i>).....	18
2.3.8 Uji Konsolidasi.....	19
2.4 Metode Pencampuran Tanah.....	24
2.4.1 Pencampuran Tanah Dangkal (<i>Shallow Soil Mix</i>).....	24



2.3	Stabilisasi Tanah	25
2.3.1	Stabilisasi Tanah dengan Kapur	26
2.3.2	Stabilisasi Tanah dengan Semen	29
2.3.3	Stabilisasi Tanah dengan <i>Fly ash</i>	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		33
3.1	Rencana Penelitian	33
3.2	Diagram Alir Penelitian	34
3.3	Pengujian	35
3.4	Analisis Data	37
3.5	Rancangan Penelitian	37
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Pengujian Pendahuluan	39
4.1.1	Pembacaan Data SPT	40
4.1.2	Uji Analisis Butiran	40
4.1.3	Sistem Klasifikasi Tanah Sistem <i>Unified</i>	41
4.1.4	Sistem Klasifikasi Tanah Sistem <i>AASHTO</i>	42
4.1.5	Uji Pemadatan	43
4.2	Analisis Hasil Pengujian Lanjutan	44
4.2.1	Pengujian Kuat Tekan Bebas (<i>Unconfined Compression Test</i>)	44
4.2.1.1	Campuran Tanah dan Kapur	44
4.2.1.2	Campuran Tanah dan Semen	46
4.2.1.3	Campuran Tanah dan <i>Fly ash</i>	48
4.2.2	Pengujian Triaksial-UU (<i>Triaxial Unconsolidated Undrained</i>)	49
4.2.2.1	Campuran Tanah dan Kapur	50
4.2.2.2	Campuran Tanah dan Semen	51
4.2.2.3	Campuran Tanah dan <i>Fly ash</i>	53
4.2.3	Pengujian Konsolidasi	55
4.2.3.1	Konsolidasi Campuran Tanah dan Kapur	56
4.2.3.2	Konsolidasi Campuran Tanah dan Semen	60
4.2.3.3	Konsolidasi Campuran Tanah dan <i>Fly ash</i>	64



BAB V PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	71



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Klasifikasi kompresilitas tanah	8
Tabel 2.2	Sifat-sifat umum lempung lunak.....	8
Tabel 2.3	Nilai-nilai khas dari aktivitas	9
Tabel 2.4	Batas – batas atterberg untuk mineral lempung	10
Tabel 2.5	Nilai <i>Specific Gravity</i> untuk tiap mineral tanah lempung.....	11
Tabel 2.6	Nilai angka pori, kadar air, dan berat volume kering pada tanah lempung .	11
Tabel 2.7	Ukuran-ukuran ayakan berdasarkan ASTM	14
Tabel 2.8	Berat Jenis Tanah.....	14
Tabel 2.9	Hubungan antara konsistensi tanah dengan kekuatan tanah lempung pada <i>test unconfined compression</i>	17
Tabel 2.10	Hubungan golongan tanag dengan sensitivity	17
Tabel 2.11	Nilai Cc untuk macam – macam jenis tanah.....	31
Tabel 4.1	Pengelompokan jenis tanah berdasarkan hasil SPT.....	39
Tabel 4.2	Hasil Kadar air optimum dan berat isi maksimum dari tiap kadar additif...	43
Tabel 4.3	Perbandingan qu dan Cu dari variasi kadar kapur	45
Tabel 4.4	Perbandingan qu dan Cu dari variasi kadar semen	47
Tabel 4.5	Perbandingan qu dan Cu dari variasi kadar <i>fly ash</i>	48
Tabel 4.6	Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar kapur	50
Tabel 4.7	Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar semen.....	52
Tabel 4.8	Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar <i>fly ash</i>	53
Tabel 4.9	Hasil Cv dengan Akar Waktu t90 dan Log Waktu t50 konsol kapur	56
Tabel 4.10	Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori konsol kapur.....	58
Tabel 4.11	Hasil Cv dengan Akar Waktu t90 dan Log Waktu t50 konsol semen	60
Tabel 4.12	Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori konsol semen.....	62
Tabel 4.13	Hasil Cv dengan Akar Waktu t90 dan Log Waktu t50 konsol <i>fly ash</i>	64
Tabel 4.14	Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori konsol <i>fly ash</i>	66
Tabel 4.15	Rangkuman nilai koefisien dan penurunan hasil uji konsolidasi.....	68

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur <i>Kaolinite</i>	6
Gambar 2.2	Struktur <i>Illite</i>	7
Gambar 2.3	Struktur <i>Montmorillonite</i>	7
Gambar 2.4	Grafik plastisitas, sistem USCS	10
Gambar 2.5	Grafik klasifikasi tanah sistem AASHTO.....	13
Gambar 2.6	Sistem pengujian kuat tekan bebas.....	16
Gambar 2.7	Alat uji tekan bebas.....	18
Gambar 2.8	Uji triaksial.....	18
Gambar 2.10	Gambar Indeks Kompresi (Cc).....	21
Gambar 2.11	Metode kecocokan log – waktu	22
Gambar 2.12	Metode akar waktu.....	23
Gambar 2.12	Alat <i>shallow soil mix</i> (SSM)	25
Gambar 3.1	Peta tempat pengambilan sampel tanah	33
Gambar 4.1	Analisis saringan dan hidrometer.....	41
Gambar 4.2	Klasifikasi Tanah USCS	42
Gambar 4.3	Klasifikasi Tanah AASHTO	42
Gambar 4.4	Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar kapur	45
Gambar 4.5	Pengaruh kadar kapur terhadap Cu	45
Gambar 4.6	Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar semen	46
Gambar 4.7	Pengaruh kadar semen terhadap Cu	47
Gambar 4.8	Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar <i>fly ash</i>	48
Gambar 4.9	Pengaruh kadar <i>fly ash</i> terhadap Cu.....	49
Gambar 4.10	Pengaruh kadar zat additif terhadap Cu	49
Gambar 4.11	Grafik hubungan kadar kapur terhadap sudut geser.....	50
Gambar 4.12	Grafik hubungan kadar kapur terhadap nilai kohesi	50
Gambar 4.13	Grafik hubungan kadar semen terhadap sudut geser	51
Gambar 4.14	Grafik hubungan kadar semen terhadap nilai kohesi.....	52



Gambar 4.15 Grafik hubungan kadar *fly ash* terhadap sudut geser53

Gambar 4.16 Grafik hubungan kadar *fly ash* terhadap nilai kohesi53

Gambar 4.17 Grafik hubungan kadar additif terhadap sudut geser Φ 53

Gambar 4.18 Grafik hubungan kadar additif terhadap nilai kohesi (c)53

Gambar 4.19 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol kapur55

Gambar 4.20 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol kapur55

Gambar 4.21 Hubungan antara tegangan dan angka pori konsol kapur56

Gambar 4.22 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol semen63

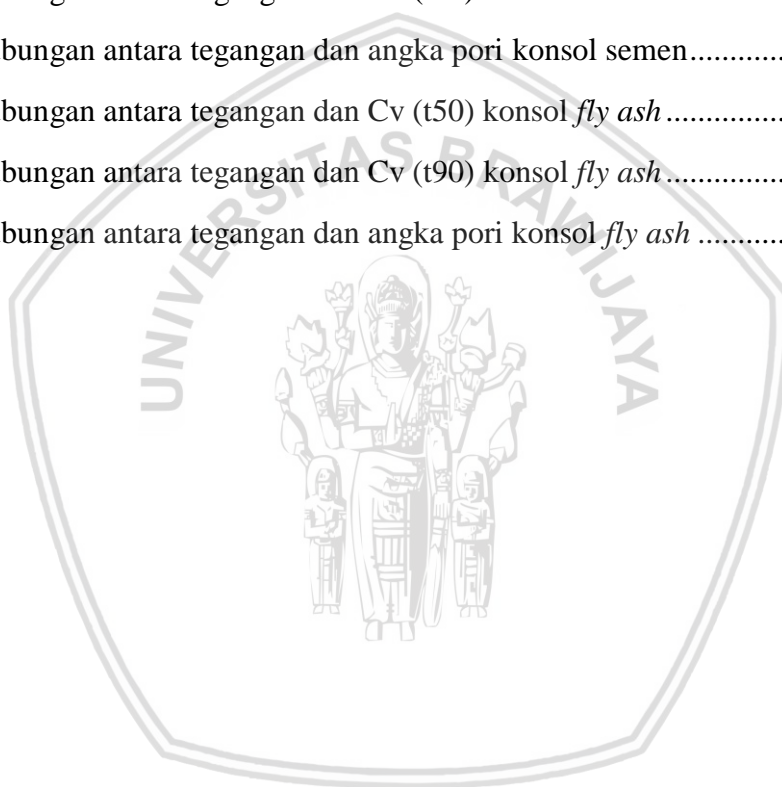
Gambar 4.23 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol semen63

Gambar 4.24 Hubungan antara tegangan dan angka pori konsol semen.....64

Gambar 4.25 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol *fly ash*65

Gambar 4.26 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol *fly ash*65

Gambar 4.27 Hubungan antara tegangan dan angka pori konsol *fly ash*66



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Data Unconfined	72
Lampiran 2	Data Triaksial.....	74
Lampiran 3	Data Konsolidasi.....	77
Lampiran 4	Data Pengujian SPT	147



RINGKASAN

Wahid Darmawan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Perubahan Stabilitas Tanah Akibat Penambahan Kapur, Semen, Dan Fly Ash Pada Tanah Lunak Proyek Tol Gempol-Pasuruan*, Dosen Pembimbing: Yulvi Zaika dan Arief Rachmansyah.

Jalan tol Gempol – Pasuruan merupakan jalan yang menghubungkan daerah Gempol, Sidoarjo dengan Kota Pasuruan. Karena akan digunakannya lahan tersebut sebagai keperluan jalan tol, maka diharapkan tanah dasarnya dapat menahan beban rencana, baik dari beban struktur maupun beban kendaraan yang akan melewati jalan tersebut. Seperti yang telah diketahui bahwa tanah di daerah tersebut bersifat kohesif, sehingga apabila terjadi anomali iklim yang dapat menyebabkan adanya variasi kadar air yang diterima oleh tanah, yang menyebabkan kondisi tanah menjadi tidak stabil. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan stabilitas akibat penambahan zat aditif, yaitu kapur, semen dan *fly ash* terhadap karakteristik tanah berdasarkan sifat fisik dan mekaniknya terutama tegangan runtuh, sudut geser, dan penurunan tanah.

Pada penelitian ini dilakukan analisis mekanik tanah yang telah dicampurkan dengan cara pencampuran tanah dangkal (*Shallow Soil Mix*) 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* 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Adapun pengujian yang akan dibandingkan yaitu uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*), uji Triaksial (*Triaxial Unconsolidated Undrained*), dan uji Konsolidasi.

Pada uji kuat tekan bebas 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%. Pada pengujian (*Triaxial Unconsolidated Undrained*) dihasilkan bahwa semakin besar kadar zat aditif 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), grafik nilai kohesi berkebalikan dengan grafik sudut geser dalam. Pada uji konsolidasi penurunan terbesar terjadi pada tanah dengan campuran kadar *fly ash*, kemudian diikuti kapur, dan penurunan terkecil terjadi pada campuran tanah dengan kadar semen.

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

SUMMARY

Wahid Darmawan, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya June 2018, *The Changes of Soil Stability Due to Addition of Lime, Cement, and Fly ash on Soft Soil in Project of Gempol-Pasuruan Toll Road*, Supervisor: Yulvi Zaika and Arief Rachmansyah.

Gempol - Pasuruan toll road is a road connecting Gempol, Sidoarjo with Pasuruan City. Since the land will be used as a toll road project, it is expected that the subgrade can withstand the allowable load, either from the load of the structure or the vehicle load that will pass through the road. As it is known that the soil in the area is cohesive, so if there is a climate anomaly that can cause the variation of water content, causing soil conditions to become unstable. This study aims to determine the change of stability due to the addition of additives, lime, cement and fly ash to soil based on physical and mechanical properties, especially soil stress failure, shear angle, and soil consolidation.

In this research, soil mechanical analysis which has been mixed by shallow soil mixing content of various additives, for lime that is 3%; 6%; 9%; 12%; and 15%, for cement by 5%, 8%, 10%, 12%, and 15%, and for fly ash 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%. The tests to be compared are Unconfined Compression Test, Triaxial Unconsolidated Undrained, and Consolidation Test.

In Unconfined Compression Test the highest value of soil stress failure (q_u) occurs on the soil with fly ash content of 15% with a percentage increase of 32%. Lime content of 6% with an increase of 20%. And for soil with 10% cement content with percentage increase of 15%. In Triaxial Unconsolidated Undrained Test it was found that the greater the additive content of the soil, especially on the cement and lime, the shear value in the (ϕ) the larger the shear. However, in fly ash the shear angle value is at its lowest point as the optimum level. In Consolidation Test the largest decrease occurred on soil with mixture of fly ash, followed by lime, and the smallest decrease occurred in soil mixture with cement content.

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

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini sedang gencar - gencarnya pembangunan di Indonesia terlebih lagi pembangunan infrastruktur, seperti pembangunan gedung, jalan tol, serta fasilitas-fasilitas umum lainnya yang itu semua agar Indonesia menjadi negara yang lebih sejahtera. Pembangunan yang paling banyak dilakukan saat ini ialah pengembangan jalan tol. Di Jawa Timur sendiri pembangunan jalan tol terdapat 9 titik salah satunya ialah jalan tol gempol-pasuruan yang memiliki panjang 34.15 km. Tol gempol-pasuruan ini menghubungkan daerah gempol sidoarjo dengan kota pasuruan. Pembangunan tol gempol-pasuruan ini sendiri dibagi menjadi 3 seksi, yaitu gempol-rembang yang berjarak 13.9 km dan bangil-rembang berjarak 8 km di seksi 1, rembang-pasuruan berjarak 6.6 km di seksi 2, dan pasuruan-grati berjarak 13.65 km di seksi 3.

Peralihan penggunaan lahan di daerah tersebut yang semula persawahan dan pemukiman penduduk menjadi jalan tol, diharapkan tanah yang menjadi jalan mampu menahan beban kendaraan yang berat. Tetapi tanah pada jalan tol gempol-pasuruan memiliki kandungan air tanah yang berlebih menjadikan konsistensi tanah yang tidak stabil dan struktur tanahnya masif. Kadar air yang berlebih pada tanah mengakibatkan daya dukung tanah yang rendah, sehingga tanah dasar tidak mampu menahan beban berat di atasnya. Maka dari itu tanah yang daya dukungnya rendah harus di stabilisasi.

Stabilisasi dilakukan dengan pencampuran mekanis ataupun ditambah dengan bahan aditif. Stabilisasi tanah merupakan usaha untuk memperbaiki sifat dasar tanah yang berguna meningkatkan daya dukung tanah atau mutu tanah agar tidak membahayakan dalam pembangunan konstruksi.

Variable yang dapat mempengaruhi daya dukung tanah adalah kuat geser tanah. Variasi kadar air yang sering berubah akan mempengaruhi kuat geser tanah tersebut yang ditandai dengan perubahan kohesi tanah. Terlebih lagi tanah yang diteliti saat ini ialah tanah lunak yang mempunyai kadar air yang tinggi dan permeabilitas yang tinggi dan plastisitas yang rendah. Karena sifat tanah yang tidak menguntungkan bagi pekerjaan konstruksi ini maka perlu penelitian untuk memperbaiki sifat tanah tersebut.

Pada penelitian yang sudah dilakukan untuk membuat tanah lunak menjadi lebih stabil adalah dengan mencampurkan tanah lunak dengan zat aditif. Zat aditif yang

dipergunakan untuk menstabilisasikan tanah lunak bisa dengan bahan industrial seperti semen, gypsum, dan kapur. Ada juga bahan lain selain bahan industrial, zat aditif juga bisa diambil dari limbah produksi seperti *rice husk fly ash* (abu sekam padi), *coal bottom ash*, *steel fly ash*, *col fly ash*.

Dalam penelitian ini akan melakukan uji *unconfined*, *triaxial*, serta uji konsolidasi pada tanah lunak di Proyek jalan tol gempol-pasuruan, Jawa Timur. Dari penelitian yang dilakukan oleh Pretty Prescilia Takaendengan, dkk (2013) dari Universitas Sam Ratulangi dan sampel tanah diambil di Desa Warembungan, Kecamatan Pineleg. Penelitian tanah lunak yang distabilisasi dengan semen dan kapur (0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%) menunjukkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah yang cukup signifikan untuk setiap penambahan kadar semen dan kapur. Stabilisasi tanah dengan semen telah banyak digunakan pada proyek-proyek jalan di banyak negara.

Umumnya penelitian yang dilakukan dengan mencampurkan sampel tanah lunak dengan bahan aditif yang dipilih. Metode mencampurkan semua sampel ini dikenal dengan pencampuran tanah permukaan (*shallow soil mix*), pencampuran dengan cara ini dilaksanakan pada wilayah lokasi tanah yang akan didirikan konstruksi di atasnya.

Penelitian ini dilakukan dengan menguji tanah lunak dengan uji *unconfined*, uji triaksial, dan uji konsolidasi untuk mengetahui perubahan nilai stabilitas tanah dengan perkuatan. Perkuatan disini dengan mencampurkan tanah lunak dengan campuran zat aditif berupa kapur, semen, dan flyash dengan kadar campuran beragam untuk mencapai hasil maksimum. Penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan daya dukung tanah lunak pada proyek jalan tol gempol-pasuruan.

1.2. Identifikasi Masalah

Ditinjau dari permasalahan yang ditimbulkan oleh tanah lunak pada konstruksi di atasnya, analisis lebih lanjut sangat perlu dilakukan. Dengan identifikasi sebagai berikut:

1. Sebuah konstruksi sangat dipengaruhi oleh tanah dasarnya, bukan hanya pergerakan yang terjadi pada tanah yang mempengaruhi tetapi juga faktor alam maupun karakteristik tanah tersebut. Ini terjadi pada tanah lunak yang mempunyai kadar air yang tinggi sehingga perlu dilakukan stabilisasi.

2. Jumlah kadar air yang tinggi dalam tanah lunak disebabkan oleh permeabilitas tanah yang tinggi serta tingginya muka air didaerah tersebut yang menyebabkan daya dukung tanah rendah dan perlu dilakukan stabilisasi
3. Pencampuran zat aditif dilakukan dengan pencampuran tanah dangkal (*shallow soil mix*)

1.3. Rumusan Masalah

Dari uraian tersebut, maka dapat dirumuskan masalah yang akan dibahas yaitu:

1. Bagaimana perubahan campuran zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap nilai tegangan runtuh (q_u) tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan?
2. Bagaimana perubahan campuran zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap nilai sudut geser dalam (ϕ) tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan?
3. Bagaimana perubahan campuran kadar optimum zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap penurunan tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan?

1.4. Batasan Penelitian

Agar lebih memperjelas ruang lingkup penelitian, maka pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Tanah yang digunakan untuk penelitian ini adalah tanah lunak dari proyek jalan tol gempol-pasuruan tepatnya di desa Kedawung Kulon, Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur.
2. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Sipil Universitas Brawijaya
3. Metode perbaikan tanah lunak dalam penelitian ini menggunakan metode pencampuran tanah permukaan (*shallow soil mixing*)
4. Penelitian ini menggunakan uji *unconfined*, uji *triaxial*, dan uji konsolidasi untuk mengetahui nilai stabilitas yang terdapat pada tanah lunak di Proyek jalan tol gempol-pasuruan, Jawa Timur.

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui perubahan zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap nilai tegangan runtuh (q_u) tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan.
2. Mengetahui perubahan zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap penurunan tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan.
3. Mengetahui perubahan campuran kadar optimum zat aditif kapur, semen, dan *fly ash* terhadap penurunan tanah lunak pada proyek tol gempol-pasuruan.

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian yang diharapkan dari penelitian ini yaitu:

1. Untuk praktisi lapangan
Sumber informasi dan pertimbangan untuk merancang suatu konstruksi jalan maupun bangunan diatas tanah lunak
2. Untuk kalangan akademis
Menjadi pengetahuan diluar perkuliahan dan referensi yang dapat digunakan pada mekanika tanah dan geoteknik yang ada kaitannya dengan kekuatan daya dukung dan stabilitas tanah lunak.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah Lempung

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). Partikel tanah tersebut di atas terdapat dalam rentang ukuran yang cukup lebar, mulai dari berangkal (boulder) sampai serbuk batu halus. (Herlien, 2008).

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 organik. Mineral – mineral lempung merupakan substansi – substansi Kristal yang sangat tipis yang pembentukan utamanya berasal dari perubahan kimia pada pembentukan mineral – mineral batuan dasar. Semua mineral lempung sangat tipis termasuk dalam kelompok – kelompok partikel kristalnya berukuran koloid ($<0,002$ mm) dan hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.

Mitchell (1976) memberikan batasan bahwa yang dimaksud dengan ukuran butir lempung adalah partikel tanah yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm, sedangkan mineral lempung adalah kelompok – kelompok partikel Kristal berukuran koloid ($<0,002$ mm) yang terjadi akibat proses pelapukan dari batuan ditambah dengan sifatnya yang dijelaskan lebih lanjut. Sedangkan menurut Craig (1987), tanah lempung adalah mineral tanah sebagai kelompok – kelompok partikel kristal koloid berukuran kurang dari 0,002 mm, yang terjadi akibat proses pelapukan kimia pada batuan yang salah satu penyebabnya adalah air yang mengandung asam ataupun alkali, dan karbondioksida.

Lapisan lunak umumnya terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butiran-butiran yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Pada lapisan lunak, semakin muda umur akumulasinya, semakin tinggi letak muka airnya. Lapisan muda ini juga kurang mengalami pembebanan sehingga sifat mekanisnya buruk dan tidak mampu memikul beban. Sifat lapisan tanah lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampatan yang besar, dan koefisien permeabilitas yang kecil. Jadi, bilamana pembebanan konstruksi melampaui daya dukung kritisnya maka dalam jangka waktu yang lama besarnya penurunan akan meningkat yang akhirnya akan mengakibatkan berbagai kesulitan.

Lempung yang terkonsolidasi normal adalah tanah lempung yang tidak pernah menderita tekanan yang lebih besar daripada tekanan yang ada pada saat sekarang. Tanah ini pada umumnya cenderung sangat kompresibel, mempunyai daya dukung ultimit rendah, dan sebagaimana pada tanah-tanah lempung lainnya, mempunyai permeabilitas yang sangat rendah. Sedangkan lempung

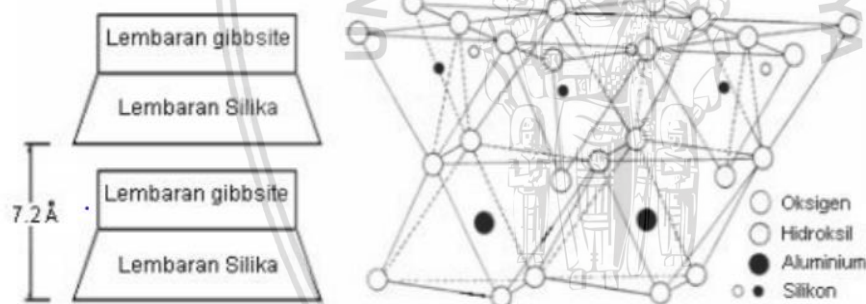
terkonsolidasi lebih adalah lempung yang pada masa silam pernah menderita tekanan yang lebih besar daripada tekanan yang ada sekarang.

2.1.1. Mineral Lempung

Mineral-mineral lempung terutama terdiri dari silikat aluminium dan/atau besi dan magnesium. Beberapa diantaranya juga mengandung alkali dan/atau tanah alkali dan/atau tanah alkalin sebagai komponen yang penting. Struktur kristalin lempung membentuk partikel pipih kecil yang mengandung muatan negatif netto pada permukaan datar partikel. Sifat-sifat dari partikel lempung dapat diilustrasikan dengan menggambar tiga subkelompok umum dari mineral lempung yaitu: *kaolinite*, *illite*, dan *montmorillonite*.

a. Kaolinite

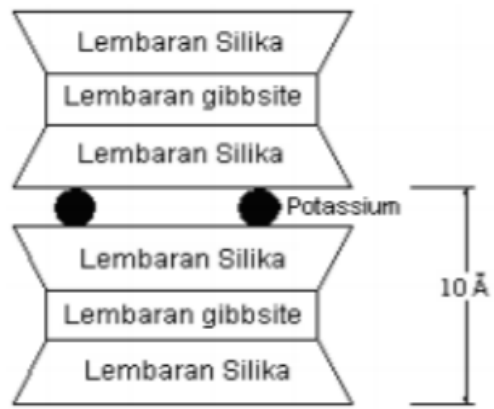
Kaolinite merupakan hasil pelapukan sulfat atau air yang mengandung karbonat pada temperatur sedang. Warna kaolinite murni umumnya putih, putih kelabu, kekuning-kuningan atau kecoklat-coklatan. Bagian dasar dari struktur ini adalah lembaran tunggal silika tetrahedral yang digabung dengan satu lembaran alumina oktahedran (*gibbsite*) membentuk satu unit dasar. Mineral *kaolinite* berwujud seperti lempengan-lempengan tipis.



Gambar 2.1 Struktur Kaolinite (Das, 1995)

b. Illite

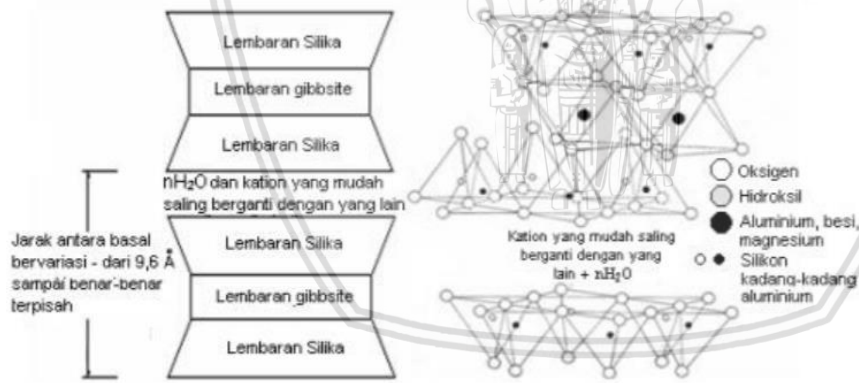
Mineral *illite* mempunyai hubungan dengan mika biasa, sehingga dinamakan pula hidrat-mika. *Illite* memiliki formasi struktur satuan kristal, tebal dan komposisi yang hampir sama dengan *montmorillonite*.



Gambar 2.2 Struktur Illite (Das, 1995)

c. *Montmorillonite*

Montmorillonite memiliki susunan kristal yang terbentuk dari susunan dua lempeng *silica tetrahedral* mengapit satu lempeng alumina oktahedral ditengahnya, maka dari itu *montmorillonite* disebut mineral dua banding satu (2:1). Hubungan antara satuan unit diikat oleh ikatan gaya *Van der Waals*. Ukuran unit massa sangat besar, dapat menyerap air dengan sangat kuat, mudah mengalami proses pengembangan.



Gambar 2.3 Struktur Montmorillonite (Das, 1995)



2.1.2. Lempung Lunak

Tanah lempung lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari tanah yang sebagian besarnya dari butir – butir yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Sifat lapisan tanah lempung lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampatan yang besar, koefisien permeabilitas yang kecil dan memiliki daya dukung yang rendah dibandingkan dengan tanah lempung lainnya. Tanah – tanah lempung lunak secara umum mempunyai sifat – sifat sebagai berikut :

1. Kuat geser rendah
2. Berkurang kuat gesernya bila kadar air bertambah
3. Berkurang kuat gesernya bila struktur tanahnya terganggu
4. Bila basah bersifat plastis dan mudah mampat
5. Menyusut bila kering dan mengembang basah
6. Kompresibilitasnya besar (Tabel 2.1)

Tabel 2.1 Klasifikasi kompresilitas tanah (Coduto, 1994)

Kompresibilitas, C	Klasifikasi
0 – 0,05	Sangat Sedikit Kompresibel
0,05 – 0,1	Sedikit Kompresibel
0,1 – 0,2	Cukup Kompresibel
0,2 – 0,35	Kompresibilitas Tinggi
>0,35	Kompresibilitas Sangat Tinggi

7. Berubah volume dengan bertambahnya waktu akibat rangkai pada beban yang konstan
8. Merupakan material kedap air

Menurut Terzaghi (1967) tanah lempung kohesif diklasifikasikan sebagai tanah lempung lunak apabila mempunyai daya dukung ultimit lebih kecil dari $0,5 \text{ kg/cm}^2$ dan nilai standard penetrasi tes lebih kecil dari 4 ($N\text{-value} < 4$). Berdasarkan uji lapangan, lempung lunak secara fisik dapat diremas dengan mudah oleh jari-jari tangan. Sifat umum lempung lunak seperti dalam Tabel 2.2

Tabel 2.2 Sifat-sifat umum lempung lunak

No.	Parameter	Nilai
1.	Kadar air	80 – 100%
2.	Batas cair	80 – 100%
3.	Batas plastis	30 – 45%
4.	Lolos saringan no.200	>90%
5.	Kuat geser	20 – 40 kN/m ²

Menurut Bowles (1993), mineral-mineral pada tanah lempung umumnya memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

1. Hidrasi

Partikel-partikel lempung dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air yang disebut sebagai air terabsorpsi. Lapisan ini pada umumnya mempunyai tebal dua molekul karena itu disebut sebagai lapisan difusi ganda atau lapisan ganda.

2. Aktivitas

Tepi – tepi mineral lempung mempunyai muatan negatif netto. Ini mengakibatkan terjadinya usaha untuk menyeimbangkan muatan ini dengan tarikan kation. Tarikan ini akan sebanding dengan kekurangan muatan netto dan dapat juga dihubungkan dengan aktivitas lempung tersebut. Aktivitas ini didefinisikan sebagai:

$$Aktifitas = \frac{\text{Indeks Plastisitas}}{\text{Presentasi Lempung}} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana persentasi lempung diambil dari fraksi tanah yang < 2 μm . Aktivitas juga berhubungan dengan kadar air potensial relatif. Nilai-nilai khas dari aktivitas dapat dilihat pada

Tabel 2.3 Nilai-nilai khas dari aktivitas (Mitchell, 1976)

Kaolinite	0,4 – 0,5
Illite	0,5 – 1,0
Montmorillonite	1,0 – 7,0

3. Flokulasi dan Dispersi

Flokulasi adalah peristiwa penggumpalan partikel lempung di dalam larutan air akibat mineral lempung umumnya mempunyai $\text{pH} > 7$ dan bersifat alkali tertarik oleh ion- ion H^+ dari air, gaya Van Der Waal. Untuk menghindari flokulasi larutan air dapat ditambahkan zat asam. Tiang pancang yang dipancang ke dalam lempung lunak yang jenuh akan membentuk kembali struktur tanah di dalam suatu zona di sekitar tiang tersebut. Kapasitas beban awal biasanya sangat rendah, tetapi sesudah 30 hari atau lebih, beban desain dapat terbentuk akibat adanya adhesi antara lempung dan tiang.

4. Pengaruh air

Air pada mineral – mineral lempung mempengaruhi flokulasi dan dispersi yang terjadi pada partikel lempung. Untuk meninjau karakteristik tanah lempung maka perlu diketahui sifat fisik atau Index Properties dari tanah lempung tersebut, yaitu :

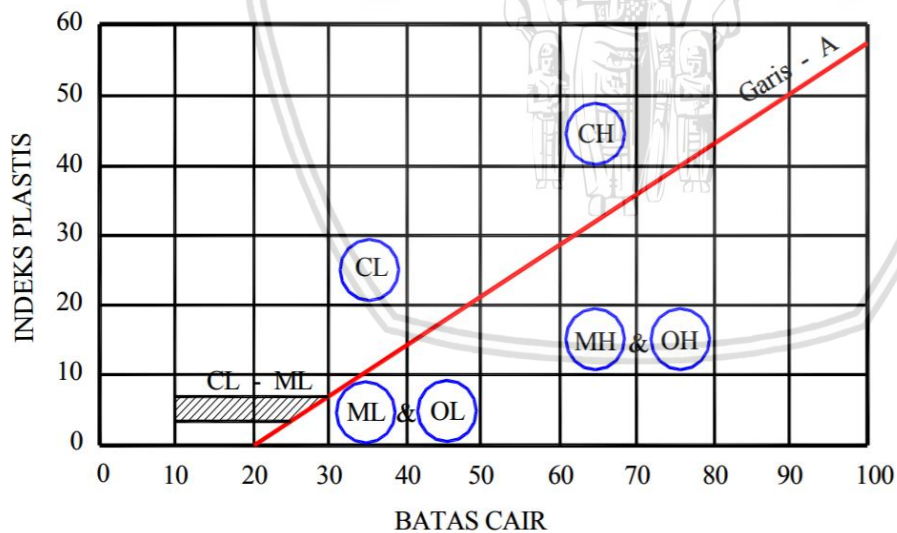
a. Batas – batas Atterberg (*Atterberg Limits*)

Atterberg telah meneliti sifat konsistensi mineral lempung pada kadar air yang bervariasi yang dinyatakan dalam batas cair, batas plastis, dan batas susut. Ada tiga jenis mineral lempung yang diteliti, yaitu: montmorillonite, illite, dan kaolinite. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Batas – batas atterberg untuk mineral lempung (Mitchel, 1976)

Mineral	Batas Cair	Batas Plastis	Batas Susut
Montmorillonite	100 – 90	50 – 100	8,5 – 15
Illite	60 – 120	35 – 60	15 – 17
Kaolinite	30 – 110	25 – 40	25 – 29

Berdasarkan Tabel 2.4 maka dapat dilihat pada Gambar 2.3, tanah lempung lunak dapat dikategorikan ke dalam kelompok MH atau OH berdasarkan sistem klasifikasi tanah unified. Dalam sistem Unified, yang dikembangkan di Amerika Serikat oleh Casagrande (1948), simbol kelompok terdiri dari huruf-huruf deskriptif primer dan sekunder. Klasifikasi didasarkan atas prosedur-prosedur di laboratorium dan di lapangan. Tanah yang mempertunjukkan karakteristik dari dua kelompok harus diberi klasifikasi pembatas yang di tandai oleh simbol yang dipisahkan oleh tanda hubung.



Gambar 2.4 Grafik Plastisitas, sistem USCS (Das, 1995)

b. Berat Jenis (SG)

Nilai *Specific Gravity* yang didasarkan pada tiap-tiap mineral pada tanah lempung lunak dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Nilai *Specific Gravity* untuk tiap mineral tanah lempung (Mitchell, 1976)

Mineral Lempung Lunak	<i>Specific Gravity</i> (GS)
Kaolinite	2,6 – 2,63
Illite	2,8
Montmorillonite	2,4

c. Permeabilitas Tanah (k)

Struktur tanah, konsistensi ion, dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung berperan penting dalam menentukan koefisien permeabilitas tanah lempung. Umumnya nilai k untuk lempung kurang dari 10^{-6} cm/detik².

d. Komposisi Tanah

Angka pori, kadar air, dan berat volume kering pada beberapa tipe tanah lempung dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Nilai angka pori, kadar air, dan berat volume kering pada tanah lempung (Mitchell, 1976)

Tipe Tanah	Angka Pori, e	Kadar air dalam keadaan jenuh	Berat volume kering (Kn/m ³)
Lempung kaku	0,6	21	117
Lempung lunak	0,9 – 1,4	30 – 50	11,5 – 14,5
Lempung organik lembek	2,5 – 3,2	30 – 120	6 – 8

Kesimpulannya adalah tanah kohesif seperti lempung memiliki perbedaan yang cukup mencolok terhadap tanah non kohesif seperti pasir. Perbedaan tersebut adalah:

- Tahanan friksi tanah kohesif < tanah non kohesif.
- Kohesi Lempung > tanah granular.
- Permeability lempung < tanah berpasir.
- Pengaliran air pada lempung lebih lambat dibandingkan pada tanah berpasir.
- Perubahan volume pada lempung lebih lambat dibandingkan pada tanah granular.

2.2. Klasifikasi Tanah Berdasarkan ASSHTO

Tanah dapat diklasifikasikan secara umum sebagai tanah yang tidak kohesif dan tanah kohesif. Istilah ini terlalu umum, sehingga memungkinkan terjadinya identifikasi yang sama untuk tanah-tanah yang hampir bersamaan sifatnya. Di samping itu klasifikasi tanah tersebut tidak cukup lengkap untuk menentukan apakah tanah itu sesuai untuk suatu konstruksi.

Dari beberapa sistem klasifikasi yang ada, salah satunya adalah American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Sistem klasifikasi tanah tersebut diawali

oleh U.S Bureau of Public Roads. Sistem ini mengklasifikasikan tanah ke dalam delapan kelompok, A-1 sampai A-7 yang dimana membutuhkan data sebagai berikut:

1. Analisis ukuran butiran
2. Batas cair dan plastis

Indeks kelompok dihitung dengan persamaan :

$$GI = (F-35) \{0,2 + 0,005 (LL-40)\} + 0,01(F-15)(PI-10) \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

- GI = Indeks Kelompok
 F = Persen tanah lolos saringan No. 200
 LL = Batas Cair
 PI = Indeks Plastisitas

Menurut AASHTO tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar yaitu A-1 sampai A-7. Tanah dengan klasifikasi A-1, A-2 dan A-3 adalah tanah berbutir yaitu 35% atau kurang jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200, sedangkan tanah dengan klasifikasi A-4, A-5, A-6 dan A-7 adalah tanah yang lebih dari 35% dan butirannya lolos ayakan No.200. Dimana masing-masing dibedakan lagi menjadi :

- 1) A-1 (A-1-a ; A-1-b), kelompok ini termasuk granular. Tanah yang terdiri dari kerikil dan pasir kasar dengan sedikit atau tanpa butir halus, dengan atau tanpa sifat plastis.
- 2) A-2 (A-2-4 ; A-2-5 ; A-2-6 ; A-2-7), termasuk kelompok gravel dan sand, terdiri dari pasir halus dengan sedikit sekali butir halus lolos No. 200 dan tidak plastis.
- 3) A-3, termasuk kelompok gravel dan sand, kelompok batas tanah berbutir kasar dan halus Dan merupakan campuran kerikil / pasir dengan tanah berbutir halus cukup banyak (< 35%)
- 4) A-4, tanah lanau dengan sifat plastis rendah
- 5) A-5, tanah lanau yang mengandung lebih banyak butir – butir plastis, sehingga sifat plastisnya lebih besar dari A-4
- 6) A-6 (silt dan clay), tanah lempung yang masih mengandung butiran pasir dan kerikil, tetapi sifat perubahan volumenya cukup besar.
- 7) A-7, tanah lempung yang lebih bersifat plastis dan mempunyai sifat perubahan yang cukup besar.

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				
Analisa Tapis; 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	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 Kelanauan atau kelepungan				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 2.5 Tabel klasifikasi tanah sistem AASHTO

2.3. Uji Laboratorium

2.3.1. Analisa Ukuran Butiran

Sifat-sifat tanah sangat bergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada suatu saringan, dengan ukuran diameter lubang tertentu. (Hardiyatmo, 2010)

Ada dua cara yang umum digunakan untuk mendapatkan distribusi ukuran-ukuran partikel tanah, yaitu:

- Analisis ayakan. Untuk ukuran partikel-partikel berdiameter lebih besar dari 0,0075 mm.
- Analisis hidrometer. Untuk ukuran partikel-partikel berdiameter lebih kecil dari 0,0075 mm. (Braja M. Das, 1985)

2.3.2. Analisis Ayakan

Analisis ayakan adalah mengayak dan menggetarkan contoh tanah melalui suatu set ayakan dimana lubang-lubang ayakan tersebut makin kecil secara berurutan. (Braja M. Das, 1985). Untuk standart di Amerika Serikat nomor ayakan 4, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 200 dan pan.

Tabel 2.7 Ukuran-ukuran ayakan berdasarkan ASTM

No. Saringan	Ukuran Lubang (mm)	No Saringan	Ukuran Lubang (mm)
4	4,75	60	0,25
6	3,35	80	0,18
8	2,36	100	0,15
10	2	140	0,106
16	1,18	170	0,088
20	0,85	200	0,075
30	0,6	270	0,053
40	0,425	Pan	
50	0,3		

2.3.3. Specific Gravity (Gs)

(Gs) didefinisikan sebagai perbandingan antara berat volume butiran padat dengan volume air pada °C. Pereiksaan ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis tanah yang mempunyai butiran lolos saringan no.4 dengan picnometer. Nilai-nilai berat jenis dari berbagai jenis tanah diberikan dalam **tabel 2.8** berikut ini:

Tabel 2.8 Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis (Gs)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau organic	2,62 – 2,68
Lempung organic	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Harga berat spesifik butiran tanah sering dibutuhkan dalam bermacam-macam keperluan perhitungan dalam mekanika tanah. Harga-harga tersebut dapat ditentukan dengan akurat melalui pengujian di laboratorium.

2.3.4. Pematatan

Pematatan adalah cara sederhana untuk memperbaiki stabilitas dan daya dukung tanah. Pematatan didefinisikan sebagai proses menaikkan berat unit tanah dengan memaksa butiran-butiran tanah menjadi lebih rapat dan mengurangi pori-pori udara. Hal ini dilakukan dengan menggunakan beban statis atau dinamis pada tanah. Tujuan pematatan adalah untuk memperoleh tanah yang mempunyai sifat-sifat fisis yang sesuai bagi suatu pekerjaan tertentu.

Pengujian pematatan standar telah dikembangkan dalam tahun 1930-an oleh Proctor (1933). Dua macam pengujian pematatan, yaitu pengujian pematatan Proctor standard dan pengujian pematatan Proctor modifikasi. Proctor mendefinisikan empat variable pematatan tanah, yaitu:

1. usaha pematatan (atau energy)
2. jenis tanah (gradasi, kohesif, atau tidak kohesif, dan sebagainya)
3. kadar air
4. berat satuan kering (proctor menggunakan angka pori)

Pengujian pematatan dilakukan pada tanah basah (pada kadar air terkontrol) dalam suatu cetakan dengan jumlah lapisan tertentu. Setiap lapisan dipadatkan dengan sejumlah tumbukan yang ditentukan dengan penumbuk dengan massa dan tinggi jatuh tertentu. Dalam percobaan impak ataupun tekanan, beberapa contoh tanah dicampur dengan kuantitas air yang makin bertambah banyak, dipadatkan di dalam acuan dan ditimbang. Apabila diketahui berat tanah basah di dalam acuan yang volumenya diketahui, maka berat satuan basah dapat langsung dihitung sebagai

$$\gamma_{wet} = \frac{\text{Berat tanah basah di dalam acuan}}{\text{Volume acuan}} \dots\dots\dots(2.3)$$

ketika kadar air diperoleh dari tanah yang dipadatkan, dan ebrat satuan kering dihitung sebagai

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1+w} \dots\dots\dots(2.4)$$

dari beberapa contoh yang dipadatkan dipakai untuk menggambarkan kurva berat satuan kering dengan kadar air.

2.3.5 Uji Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah adalah kemampuan tanah melawan tegangan geser yang terjadi pada saat terbebani. Keruntuhan geser (*Shear failure*) tanah terjadi bukan disebabkan karena hancurnya butir-butir tanah tersebut tetapi karena adanya gerak relatif antara butir-butir tanah tersebut (Santosa, et al, 1998). Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisis-analisis kapasitas dukung tanah, stabilitas lereng, dan gaya dorong pada dinding penahan tanah. Kekuatan geser ini diukur dalam dua istilah parameter tanah yaitu kohesi atau tarik menarik antar-partikel dan sudut gesekan dalam ϕ (Bowles, 1986). Kekuatan geser yang dimiliki oleh suatu tanah disebabkan oleh (Santosa, et al, 1998):

- Pada tanah berbutir halus (kohesif) misalnya lempung kekuatan geser yang dimiliki tanah disebabkan karena adanya kohesi atau lekatan antara butir-butir tanah (*c soil*).
- Pada tanah berbutir kasar (non kohesif), kekuatan geser disebabkan karena adanya gesekan antara butir-butir tanah sehingga sering disebut sudut geser dalam (ϕ soil).
- Pada tanah yang merupakan campuran antara tanah halus dan tanah kasar (*c dan ϕ soil*), kekuatan geser disebabkan karena adanya lekatan (karena kohesi) dan gesekan antara butir-butir tanah (karena ϕ).

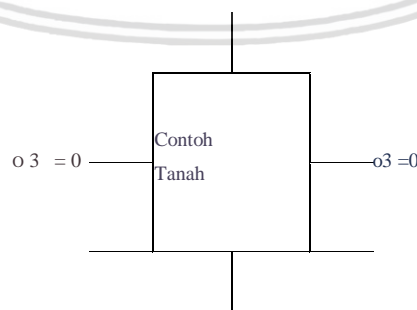
Kuat geser tanah dari benda uji yang diperiksa di laboratorium, biasanya dilakukan dengan beban besar yang ditentukan lebih dulu dan dikerjakan dengan menggunakan tipe peralatan yang khusus. Ada beberapa cara untuk menentukan kuat geser tanah, antara lain:

- Uji geser langsung (*direct shear test*).
- Uji tekan bebas (*unconfined compression test*).
- Uji triaksial (*triaxial test*).
- Uji kipas geser (*vane shear test*).

Pada penelitian ini digunakan uji tekan bebas (*unconfined compression test*) dan uji triaksial (*triaxial test*).

2.3.6 Uji Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

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%. Percobaan *unconfined* terutama dilakukan pada tanah lempung (*clay*) atau lanau (*silt*). Bila lempung mempunyai derajat kejenuhan 100%, maka kekuatan gesernya dapat ditentukan langsung dari nilai kekuatan *unconfined*.



Gambar 2.16 Sistem pengujian kuat tekan bebas.

Pada pengujian kuat tekan bebas, tegangan penyekap σ_3 adalah nol. Tegangan aksial dilakukan terhadap benda uji secara relatif cepat sampai tanah mengalami keruntuhan. Pada titik keruntuhan, harga tegangan total utama kecil (total minor *principal stress*) adalah nol dan tegangan total utama besar adalah σ_1 (Das, 1988). Pengujian ini hanya cocok untuk jenis tanah

lempung jenuh, dimana pada pembebanan cepat, air tidak sempat mengalir ke luar dari benda ujinya. Pada lempung jenuh, tekanan air pori dalam benda uji pada awal pengujian negative (tegangan kapiler). Pada saat keruntuhan, karena $\sigma_3=0$, maka:

$$\sigma_1 = \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_f = \Delta\sigma_f = q_u \quad (2-3)$$

Dengan q_u adalah kuat tekan bebas (*unconfined compression strength*) pada pengujian tekan bebas. Secara teoritis, nilai dari A_{of} pada lempung jenuh seharusnya sama seperti yang diperoleh dari pengujian-pengujian triaksial *unconsolidated-undrained* dengan benda uji yang sama. Dimana S_u atau C_u adalah kuat geser *undrained* dari tanahnya. Hubungan konsistensi dengan kuat tekan bebas tanah lempung dapat dilihat dalam tabel di bawah ini:

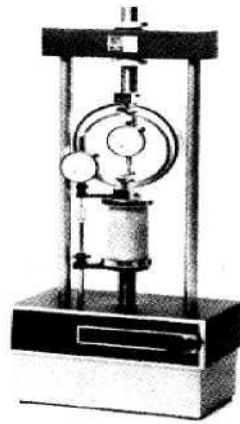
Konsistensi Tanah Lempung	Harga q_u		
	(Ton, fr)	(kN/itf)	(kg/cm ²)
Sangat lunak	0-0.25	0-23.94 (=24)	<0.27
Lunak	0.25-0.50	24-48	0.27-0.54
Menengah	0.50-1	48-96	0.54-1.08
Kaku	1-2	96-192	1.08-2.16
Sangat kaku	2-4	192-383	2.16-4.32
Keras	<4	>383	>4.32

Tabel 2.9 Hubungan antara konsistensi tanah dengan kekuatan tanah lempung pada *test unconfined compression (UCT)*.

Sensitivity merupakan perbandingan antara kekuatan asli (*undisturbed*) dengan kekuatan setelah tekan (*remolded*). Semakin besar kekuatan yang hilang semakin tinggi sensitivity tanah tersebut.

Tabel 2.10 Hubungan golongan tanah dengan sensitivity.

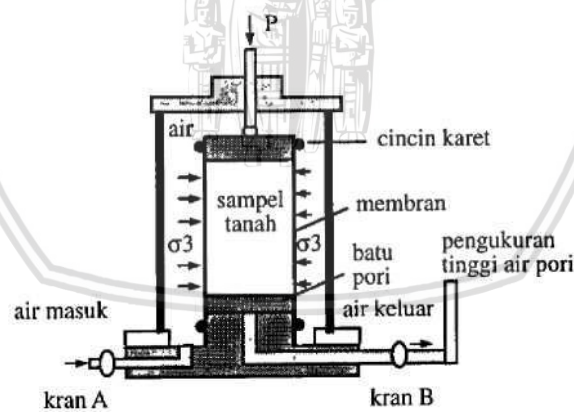
Golongan tanah	Sensivitas
Normal	< 4
Sensitif	4-8
Ekstra Sensitif	8-16
Quick	>16



Gambar 2.7 Alat uji tekan bebas (*unconfined compression test*).

2.3.7 Uji Triaksial (*Triaxial Test*)

Pada pengujian ini sampel tanah diletakkan di atas dasar sel dan dibagian atas ditutup. Sampel tanah ditutup dengan membran yang diameternya sama dengan sampel. Sel diisi dengan air dengan tegangan air dinaikkan sampai nilai yang dimaksudkan. Tegangan sel (σ_3) dibiarkan bekerja selama jangka waktu tertentu. Pengukuran kuat geser dilakukan dengan memberikan tekanan vertikal pada sampel. Pembacaan dapat dilakukan pada proving ring pada tegangan tertentu. Dari pembacaan dapat diketahui tekanan maksimum yang terjadi saat terjadi keruntuhan.



Gambar 2.15 Uji triaksial (*triaxial test*).

Sampel tanah berbentuk silinder dengan tinggi minimal dua kali diameter. Sampel tanah dibungkus dengan karet tipis sehingga air tidak dapat keluar, kemudian dimasukkan ke dalam silinder yang diberi air dan tekanan, sehingga air akan masuk kesegala arah (σ_3). Ini disebut tegangan sel dan besarnya konstan. Dari atas, sampel tanah ditekan dengan beban P yang berangsur-angsur dinaikkan.

$$\text{Maka} \quad : \quad \sigma_1 = p + \sigma_3 \quad (2-6)$$

Dimana - adalah tekanan deviator.

P dan σ_3 akan memecahkan tanah. Untuk mencari c dan ϕ semu berdasarkan tekanan total dalam hal ini kran air masuk ditutup, sehingga air dalam tanah tidak dapat keluar (*undrained*). Beban P baru diberikan setelah σ_3 bekerja, sehingga tidak memberikan kesempatan pada tanah berkonsolidasi (*unconsolidated*).

Kondisi pengujian triaksial dibagi menjadi 3 (Santosa, et al, 1995):

1. *Unconsolidated Undrained (UU)*

Pada pengujian ini sampel tanah tidak dikonsolidasi terlebih dahulu sebelum pembebanan. Selama pengujian kran untuk masuknya air selalu ditutup sehingga tidak terjadi drainasi. Setelah σ_3 bekerja, σ_1 dapat langsung dikerjakan tanpa harus menunggu sampel terkonsolidasi.

2. *Consolidated Undrained (CU)*

Sebelum P diaktifkan sampel tanah harus dikonsolidasi dulu dengan beban σ_3 dengan cara σ_3 diaktifkan dulu dan diberi waktu supaya air pori keluar terlebih dahulu. Setelah konsolidasi benar-benar selesai, barulah beban diaktifkan dengan penambahan beban sampai tanah pecah. Cara ini digunakan untuk pengujian sampel tanah pada umumnya.

3. *Consolidated Drained (CD)*

Tanah dikonsolidasi dahulu oleh tekanan sel σ_3 kran air masuk dibuka dan ditunggu sampai konsolidasi selsesao. Pembebanan dilakukan perlahan-lahan dan kran masuknya air selalu terbuka sehingga tekan pori nol dan didapatkan σ_3 dan σ_1 . Cara ini sesuai untuk pengujian tanah kapasiran dan nilai k tinggi.

2.3.8 Uji Konsolidasi

Konsolidasi merupakan suatu proses pemampatan tanah, dan berkurangnya volume pori dalam tanah. Hal ini dapat menghasilkan bertambahnya daya dukung tanah. Namun, selama proses ini terjadi tidak diperbolehkan adanya bangunan yang sedang berdiri di atas tanah tersebut. Proses ini biasanya memakan waktu yang cukup lama dari tahunan bahkan sampai puluhan tahun. Dikarenakan durasi yang terlalu lama hal ini akan sangat tidak menguntungkan untuk melakukan kegiatan konstruksi. Namun apabila konstruksi tetap dilakukan sebelum proses konsolidasi terjadi, maka kemungkinan besar akan terjadi proses keruntuhan bangunan akibat proses konsolidasi. Menurut Braja M. Das (1985) yang dikutip oleh Yamali, F., Y.

(2011) dalam jurnalnya yang berjudul “Pengaruh Kadar Air Terhadap Nilai Konsolidasi di Tanah Lempung Pada Lokasi yang Sama”, konsolidasi terbagi menjadi 2 yaitu:

- *Immediate Settlement*

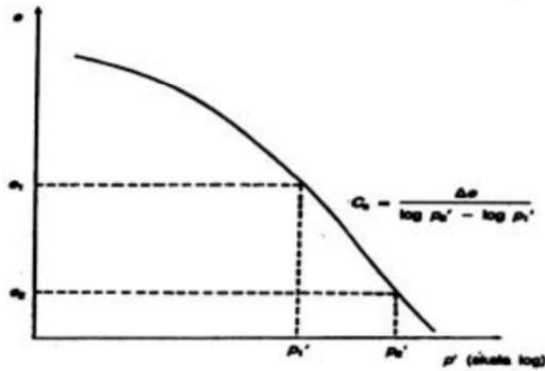
Terjadi akibat deformasi elastis tanah kering, basah dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.

- *Consolidation Settlement*

Hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.

Pada umumnya konsolidasi terjadi dalam satu arah saja atau disebut juga one dimensional consolidation. Pergerakan arah horizontal dapat diabaikan, karena tertahan oleh lapisan tanah yang berada di sekelilingnya. Parameter – parameter konsolidasi suatu tanah yaitu indeks kompresi (C_c) dan koefisien konsolidasi (C_v). Indeks kompresi berhubungan dengan berapa besarnya penurunan yang akan terjadi. Nilai indeks kompresi (C_c) adalah kemiringan garis penurunan dari garis konsolidasi tanah teoritis atau sama dengan garis konsolidasi tanah asli. Garis konsolidasi agak lebih landai dari garis konsolidasi lapangan, karena dipengaruhi oleh ketidaksempurnaan keasliannya misalnya kurang baiknya pengambilan sampel. Dari penelitian diperoleh sifat bahwa garis laboratorium dan garis lapangan berpotongan pada garis $e = 0,42 e_0$. Sifat ini dipergunakan untuk menarik garis lapangan.

Untuk menentukan nilai C_c , sebelumnya kita perlu menentukan terlebih dahulu besarnya tekanan prakonsolidasi. Casagrande (1936) menyarankan suatu cara yang mudah untuk menentukan besarnya tekanan prakonsolidasi, p_c , dengan berdasarkan grafik angka pori (e) terhadap $\log p$ yang digambar dari hasil percobaan konsolidasi di laboratorium.

2.10 Gambar Indeks Kompresi (C_c)

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} = \frac{(e_1 - e_2)}{\log p_2' - \log p_1'} = \frac{e_1 - e_2}{\log(p_2'/p_1')} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dari penelitian (Terzaghi dan Peck, 1967), untuk lempung normally consolidated:

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \dots \dots \dots (2.7)$$

Untuk tanah yang dibentuk (remolded) :

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \dots \dots \dots (2.8)$$

Untuk setiap tanah berbeda – beda. Berikut adalah tabel nilai C_c untuk bermacam – macam tanah:

Tabel 2.11 Nilai C_c untuk macam – macam jenis tanah

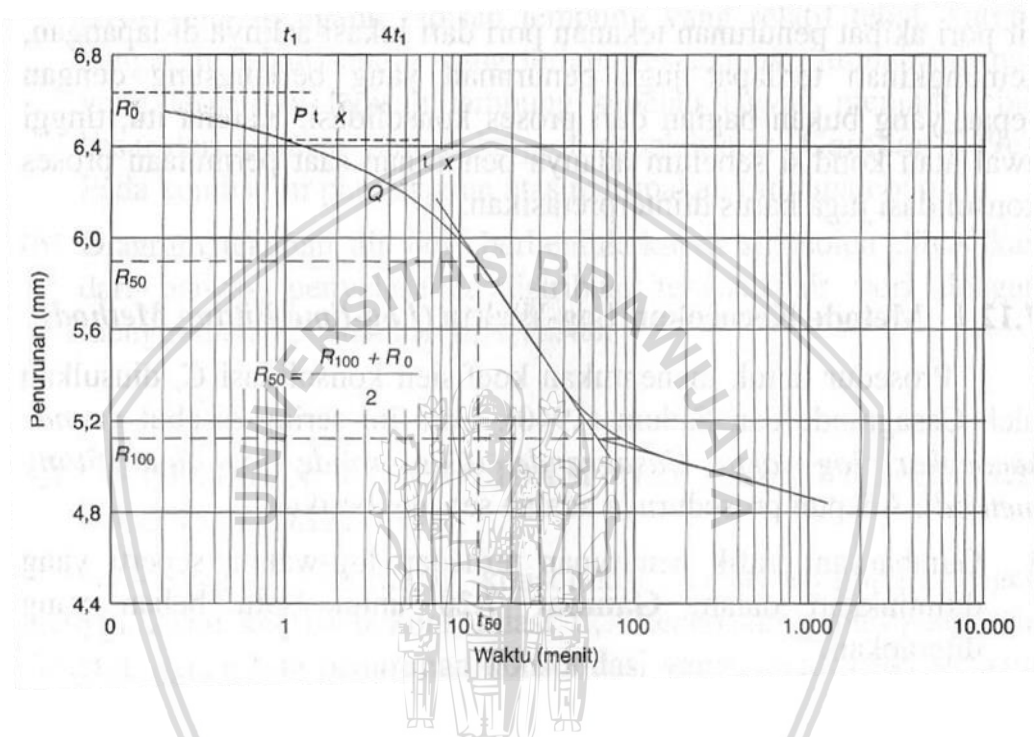
Jenis Tanah	Nilai C_c
Pasir padat	$0,0005 \pm 0,001$
Pasir tidak padat	$0,025 \pm 0,05$
Lempung agak kenyal	$0,03 \pm 0,06$
Lempung kenyal	$0,06 \pm 0,15$
Lempung medium s/d lunak	$0,15 \pm 1,0$
Tanah organik	$1,0 \pm 4,5$
Batu / cadas	0

Koefisien konsolidasi (C_v) adalah 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 konsolidasi yang akan terjadi untuk ke depannya. Untuk menentukan

nilai dari Cv dapat digunakan beberapa metode seperti metode Log – Waktu, dan metode Akar Waktu.

a) Metode Kococokan Log-Waktu

Prosedur ini diusulkan oleh Casagrande dan Fadum (1940). Bisa digunakan apabila konsolidasi sekunder teramati. Bagian kurva konsolidasi primer dan sekunder cukup jelas



Gambar 2.11 Metode kecocokan log – waktu (Cassagrande, 1940)

Prosedur penggambaran grafik sebagai berikut :

1. Gambarkan grafik penurunan terhadap log waktu untuk beban yang diterapkan.
2. Titik awal kurva ditentukan (mendekati parabola). Tentukan dua titik yaitu pada saat t_1 (titik P) Dan $4t_1$ (titik Q). Jarak vertikal PQ diukur (misalnya x). kedudukan $R = R_0$ digambarkan dengan mengukur jarak x vertikal diatas titik P.
3. Titik U = 100%, atau R_{100} diperoleh dari titik potong dua bagian linier kurva, yaitu titik potong bagian lurus terkonsolidasi primer dan sekunder.
4. Titik U = 50% ditentukan dengan

$$R_{50} = (R_0 + R_{100}) / 2 \dots \dots \dots (2.9)$$

Dari sini diperoleh t_{50} . Nilai T_v sehubungan dengan $U = 50\%$ adalah 0,197, sehingga C_v dinyatakan dalam persamaan :

$$C_v = \frac{0,197Ht^2}{t_{50}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

C_v = Koefisien Konsolidasi (m³/dt)

H_t = Tinggi rata – rata sampel (m)

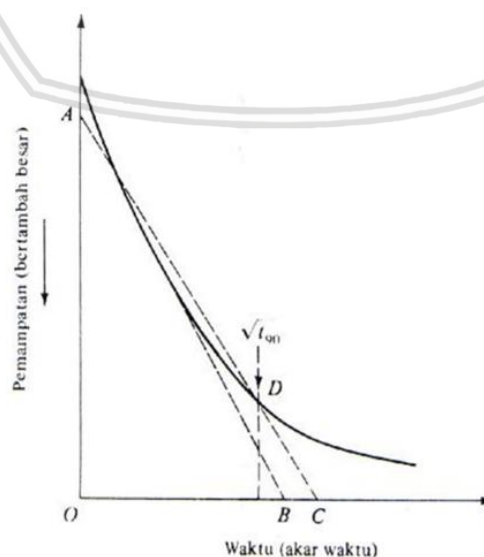
t_{50} = Waktu untuk derajat konsolidasi 50% (dt)

b) Metode Akar Waktu

Metode ini digunakan untuk menentukan nilai C_v dengan menggambarkan grafik hubungan akar waktu terhadap penurunan. Kurva biasanya linier sampai dengan 60% konsolidasi. Kurva ini digunakan untuk menentukan derajat konsolidasi $U = 90\%$, dimana disini absis OR akan sama dengan 1,15 kali absis OQ. Untuk memperoleh derajat konsolidasi $U = 90\%$ adalah sebagai berikut :

1. Gambar suatu garis AB melalui bagian awal kurva (ambil kurva yang lurus).
2. Gambar suatu garis AC sehingga $OC = 1.15 OB$. Absis titik D, yang merupakan perpotongan antara garis AC dan kurva konsolidasi merupakan perpotongan antara garis AC dan kurva konsolidasi, memberikan harga akar waktu untuk tercapainya konsolidasi 90 %.
3. Hitung koefisien konsolidasi dengan menggunakan rumus berikut:

$$C_v = \frac{0,848 \times H_{dr}^2}{t_{90}} \dots\dots\dots(2.10)$$



Gambar 2.12 Metode akar waktu (Taylor, 1948)

2.4. Metode Pencampuran Tanah

Metode pencampuran ini merupakan teknologi perbaikan tanah yang digunakan untuk memperbaiki tanah dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan dan mengurangi kompresibilitas. Metode ini termasuk metode mekanis yang dilakukan dengan cara pencampuran tanah asli dengan bahan aditif seperti *fly ash* atau bahan lainnya dengan kadar tertentu. Ada dua kategori umum untuk metode ini yaitu pencampuran tanah dangkal (*Shallow Soil Mix*) dan pencampuran tanah dalam (*Deep Soil Mix*).

2.4.1. Pencampuran Tanah Dangkal (*Shallow Soil Mix*)

Shallow Soil Mix (SSM) 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 hidrolis 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.

Setelah bahan aditif tercampur sesuai dengan kadar tertentu dilanjutkan dengan proses pemadatan untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diinginkan (Arias et al, tanpa tahun).



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.12 Alat *shallow soil mix* (SSM): (a) *bucket mixing type*; (b) *rotary blender type*; (c) *trencher type*. Sumber: Kitazume (2014).

2.3 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 sensitifitas terhadap perubahan kadar air, maka dapat dilakukan dengan cara penanganan dari yang paling mudah, seperti pemadatan sampai teknik yang lebih mahal, seperti: mencampur tanah dengan semen, kapur, abu terbang, injeksi semen (*grouting*) dan lainnya.

Dalam suatu proyek, landasan kerja untuk alat berat membutuhkan permukaan jalan yang kuat. Maka dari itu, bila tanah di lokasi proyek tidak memenuhi syarat, maka dibutuhkan penanganan yang cukup, sehingga alat berat dapat bekerja. Dengan penanganan tersebut, waktu pelaksanaan menjadi lebih cepat dan efisien. Stabilisasi dilakukan bila tanah di lokasi proyek tidak memenuhi syarat bila digunakan untuk rekayasa bangunan tertentu.

Umumnya stabilisasi tanah dibagi menjadi dua, yaitu:

1. stabilisasi mekanis
2. stabilisasi dengan bahan-tambah

Stabilisasi mekanis adalah stabilisasi tanah yang dilakukan dengan cara mencampur atau mengaduk dua macam tanah atau lebih yang bergradasi berbeda untuk memperoleh material yang memenuhi syarat kekuatan tertentu. Material yang telah dicampur ini, kemudian dihamparkan dan dipadatkan di lokasi proyek. Stabilisasi mekanis juga dapat dilakukan dengan cara menggali tanah buruk di tempat dan menggantinya dengan material granuler dari tempat lain.

Stabilisasi tanah dengan menggunakan bahan-tambah atau *additive* adalah dengan cara menambahkan bahan-tambah tersebut ke dalam tanah dengan perbandingan yang tepat sehingga dapat memperbaiki sifat-sifat teknis tanah, seperti: kekuatan, tekstur, kemudahan dikerjakan (*workability*) dan plastisitas. Contoh bahan-tambah olahan pabrik adalah kapur, semen Portland, abu-terbang (*fly-ash*), aspal, dan lain-lain. Stabilisasi tanah dengan bahan *additive* atau yang biasanya disebut dengan stabilisasi kimiawi bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah menjadi lebih baik dan sesuai dengan yang diinginkan.

2.3.1 Stabilisasi Tanah dengan Kapur

Kapur berasal dari batukapur alami, dan tipe kapur tertentu yang terbentuk bergantung pada material induk dan proses produksinya. Menurut SNI 03-4147-1996 tipe kapur dibagi menjadi 4 macam yaitu;

- 1) Kapur tipe I yaitu kapur yang mengandung kalsium hidrat tinggi; dengan kadar magnesium oksida (MgO) paling tinggi 4%,
- 2) Kapur tipe II yaitu kapur magnesium atau dolomite yang mengandung magnesium oksida lebih dari 4% dan maksimum 36% berat,
- 3) Kapur tohor (CaO) yaitu hasil pembakaran batukapur pada suhu $\pm 90^{\circ}\text{F}$, dengan komposisi sebagian besar kalsium karbonat (CaCO₃),
- 4) Kapur padam, yaitu kapur dari hasil pepadaman kapur tohor dengan air, sehingga berbentuk hidrat Ca(OH)₂.

Sejak lama campuran lempung-kapur telah banyak dipakai sebagai bahan bangunan. Di Amerika, sejak tahun 1920-an stabilisasi tanah dengan kapur telah dipakai untuk membangun jalan

tanpa perkerasan, yaitu untuk mencegah terjadinya alur-alur dan disintegrasi permukaan jalan selama musim hujan dan musim salju.

Kapur adalah kalsium oksida (CaO) yang dibuat dari batuan karbonat yang dipanaskan pada suhu sangat tinggi. Kapur tersebut umumnya berasal dari batukapur (*limestone*) atau dolomite. Penambahan kapur dalam tanah merubah tekstur tanah. Tanah lempung berubah menjadi berkelakuan mendekati lanau atau pasir, akibat penggumpalan partikel. Pencampuran tanah dengan kapur memperlihatkan pengurangan secara signifikan partikel berukuran lempung ($<0,002$ mm) dibandingkan dengan lempung aslinya.

Stabilisasi tanah menggunakan kapur lebih cocok dilakukan terhadap tanah lempung dibandingkan dengan tanah granuler. Larutan kapur dapat dilakukan untuk perawatan tanah yang terlalu basah atau kering. Untuk aplikasi jalan raya, stabilisasi tanah-kapur banyak digunakan untuk bangunan lapis pondasi-bawah (*subbase*) atau perbaikan tanah-dasar (*subgrade*). Stabilisasi tanah kapur telah banyak digunakan pada proyek jalan raya, bandara, dan jalan kerja pada area proyek.

Penambahan kapur pada tanah akan menghasilkan kepadatan maksimum yang lebih rendah dan kadar air optimum yang dihasilkan lebih tinggi daripada bagi tanah yang tidak diperbaiki. Serta kapur mengakibatkan penurunan indeks plastisitas. Stabilisasi tanah menggunakan kapur sering digunakan untuk menurunkan potensi pengembangan atau (*swelling*) dan tekanan pengembangan pada tanah lempung. Penambahan kapur menghasilkan konsentrasi ion-ion kalsium yang tinggi dalam lapis ganda sekeliling partikel-partikel lempung, sehingga mengurangi tarikan bagi air.

Biasanya kekuatan lempung basah dapat dinaikkan apabila ditambahkan kapur dengan jumlah yang tepat. Kenaikan kekuatan ini diakibatkan sebagian oleh penurunan sifat-sifat plastis dari lempung dan sebagian oleh reaksi pozzolanis dari kapur dengan tanah, yang menghasilkan bahan tersemen yang kenaikan kekuatannya dipengaruhi waktu. Tanah yang diperbaiki dengan kapur, pada umumnya, mempunyai kekuatan yang lebih besar dan modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada tanah-tanah yang tidak diperbaiki.

Menurut Rollings dan Rollings (1996), mekanisme reaksi tanah-kapur adalah sebagai berikut:

Penambahan kapur ke dalam tanah, memberikan ion-ion kalsium yang berlimpah (ion-ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}). Ion-ion Ca ini cenderung menggantikan kation-kation pada umumnya, seperti sodium (Na^+) atau potassium (K^+) yang berada pada partikel lempung. Proses ini disebut sebagai pertukaran kation. Penggantian sodium atau potassium dengan kalsium akan mereduksi indeks plastisitas partikel lempung secara signifikan. Penambahan kapur yang memberikan kenaikan pH tanah, juga menambah kapasitas pertukaran kation. Akibatnya, walaupun tanah mempunyai kalsium yang tinggi, stabilisasi tanah dengan kapur tetap akan mereduksi plastisitas tanah.

Pada umumnya, penambahan kapur dalam tanah berbutir halus, oleh adanya air akan menyebabkan reaksi-reaksi, sebagai berikut (Rollings dan Rollings, 1996):

- 1) Ketika tanah dicampur kapur dan ditambah air, dalam tanah berbutir halus timbul pertukaran kation dengan cepat dan reaksi pengumpulan-pengumpulan. Pengumpulan dan penggumpalan menghasilkan perubahan tekstur: partikel-partikel lempung menggumpal secara bersama-sama, sehingga terbentuklah partikel-partikel tanah dengan ukuran yang lebih besar. Pertukaran kation dan flokulasi menyebabkan perbaikan dengan cepat pada: plastisitas tanah, kemudahan dikerjakan (*workability*), kekuatan, dan sifat-sifat tegangan deformasinya.
- 2) Reaksi pozzolanik tanah-kapur terjadi dalam bentuk variasi bahan perantara sementasi. Hasil reaksinya adalah menambah kekuatan campuran yang telah dipadatkan dan keawetannya. Reaksi pozzolanik merupakan reaksi yang bergantung pada waktu dan temperature. Kekuatan ultimit campuran berkembang secara bertahap, dan dalam beberapa hal dapat berlangsung sampai beberapa tahun. Temperature yang tinggi lebih mempercepat reaksi.

Kapur, bila ditambahkan dalam tanah lempung basah, kapur menjadi terhidrasi dan menyebabkan tanah menjadi kering dengan segera. Karena itu, kapur dapat berfungsi untuk mengeringkan tanah di area proyek basah. Kapur tohor (CaO) lebih cepat mengeringkan tanah dibandingkan kapur terhidrasi $\{\text{Ca}(\text{OH})_2\}$.

Ketika kapur ditambahkan dalam tanah lempung, walaupun sedikit, plastisitas tanah bertambah tajam dalam waktu yang singkat. Kenaikan plastisitas bersama-sama dengan penyerapan air oleh kapur yang kering dan sejumlah kecil reaksi awal yang dihasilkan, nampak di lapangan sebagai aksi pengeringan. Dengan kata lain, lempung yang awalnya dalam kondisi plastis dapat menjadi semi-padat atau mudah pecah. Proses selanjutnya, interaksi antara lempung-air menjadi terhalang, sehingga indeks plastisitas (*PI*) berkurang dan batas susut (*SL*) bertambah. Distribusi butiran tanah juga berubah. Butiran baru, yaitu agregat lempung yang tersementasi secara lemah, kebanyakan menjadi berukuran mendekati butiran pasir. Setelah campuran tanah-kapur dipadatkan, maka terjadi kenaikan kadar air optimum dan pengurangan berat volume kering maksimum, bila dibandingkan dengan tanah yang tidak dicampur kapur. Pencampuran lempung dengan kapur juga mengurangi potensi pengembangan dan tekanan pengembangan (Kreb dan Walker, 1971)

Umumnya, ada 2 tujuan utama penggunaan kapur untuk stabilisasi tanah, yaitu:

- 1) kapur untuk memodifikasi sifat-sifat tanah, yaitu untuk mengurangi plastisitas, menambah mudah dikerjakan, menambah diameter butiran dan lain-lain. Di sini, kriteria untuk stabilisasi campuran secara mekanik diterapkan.
- 2) Kapur ditujukan untuk stabilisasi tanah secara permanen.

2.3.2. Stabilisasi Tanah dengan Semen

Berdasarkan ASI (Asosiasi Semen Indonesia), Semen adalah perekat hidraulis bahan bangunan, artinya akan jadi perekat bila bercampur dengan air. Semen Portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara mencampurkan batu kapur yang mengandung kapur (CaO) dan lempung yang mengandung silika (SiO₂), oksida alumina (Al₂O₃) dan oksida besi (Fe₂O₃) dalam oven dengan suhu kira-kira 145°C sampai menjadi klinker. Klinker ini dipindahkan, digiling sampai halus disertai penambahan 3-5% gips untuk mengendalikan waktu pengikat semen agar tidak berlangsung terlalu cepat (Aman Subakti,1994).

Dalam semen portland ini terdapat susunan senyawa semen yang berfungsi sebagai berikut:

1. C₃S = 3 CaO.SiO₂ (Trikalsium Silikat) mempunyai andil yang besar terhadap fungsi sebagai perekat dan dapat mengeras jika bereaksi dengan air sehingga dapat meningkatkan kekuatan tekan
2. C₂S = 2 CaO.SiO₂ (Dikalsium Silikat) berfungsi sama dengan C₃S
3. C₃A = 3 CaO.Al₂O₃ (Trikalsium Aluminat) dalam semen *portland* tidak berfungsi sebagai perekat. Senyawa ini hanya berfungsi sebagai fluks (bahan pelebur) sewaktu masih ada dalam tungku pembakaran, sehingga akan mudah terbentuk senyawa C₃S dan C₂S
4. C₄AF = 4 CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ (Tetra Alumineferrit) berfungsi sama seperti C₃A serta andil terhadap warna semen.
5. Gips = CaSO₄.2H₂O berfungsi sebagai retarder atau memperlambat waktu pengerasan tepung semen *portland* bila bercampur dengan air.
6. Selain itu terdapat komposisi kimia lain seperti: C=CaO, Na₂O, K₂O dalam jumlah yang kecil.

Perbaikan tanah lempung dengan *portland cement* (PC) merupakan proses kimia yang dapat mengubah struktur tanah dengan jalan membentuk butiran agregat yang lebih besar sehingga akan memberikan pengaruh yang sangat menguntungkan. Peristiwa kimia terjadi antara tanah dan *portland cement* (PC), ketika keduanya dicampur dengan menambahkan sejumlah air. Hasil dari proses pencampuran adalah semakin besar prosentase semen, berat isi kering tanah semakin bertambah dan kadar air optimum tanah semakin berkurang (Pretty, 2013)

Penelitian yang dilakukan oleh Andriani et al, (2012) menggunakan *portland cement* (PC) type I dan tanah lempung yang berasal dari daerah Lambung Bukit, Padang. Penambahan *portland cement* (PC) yang dilakukan adalah dengan prosentase 5%, 10%, 15% dan 20% dari berat tanah kering. Diperoleh nilai maksimum CBR sebesar 64,138% pada penambahan kadar semen sebesar 20% dengan γ_d maksimum 1,315 gr/cm³ dan kadar air optimum 32,9% dalam waktu perendaman selama 3 hari.

2.3.3. Stabilisasi Tanah dengan *Fly ash*

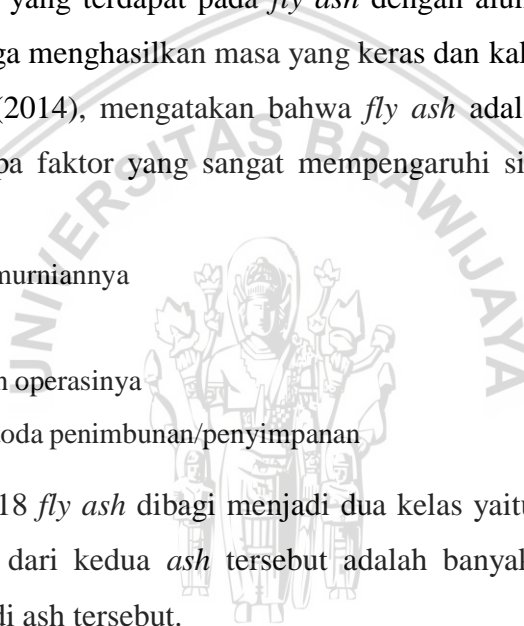
Fly ash merupakan bagian terbesar dari abu batubara yang memiliki ukuran butiran yang halus dan menampakkan warna keabu-abuan (Hartosukma, 2005). Pada intinya *fly ash* mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO) juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan sejumlah karbon (Munawir, 2014). Penambahan *fly ash* pada tanah ekspansif dimaksudkan agar terbentuk reaksi *pozzolanic*, yaitu reaksi antara kalsium yang terdapat pada *fly ash* dengan alumina dan silikat yang terdapat pada tanah, sehingga menghasilkan masa yang keras dan kaku (Gogot, 2003).

Menurut Munawir (2014), mengatakan bahwa *fly ash* adalah suatu bahan yang heterogen, terdapat beberapa faktor yang sangat mempengaruhi sifat-sifat fisik, kimia, dan teknik antara lain:

- a. Jenis batubara dan kemurniannya
- b. Derajat kehalusan
- c. Jenis ketel (*boiler*) dan operasinya
- d. Pengumpulan dan metoda penimbunan/penyimpanan

Menurut ASTM C618 *fly ash* dibagi menjadi dua kelas yaitu *fly ash* kelas C dan kelas F. Perbedaan utama dari kedua *ash* tersebut adalah banyaknya calcium, silika, aluminium dan kadar besi di ash tersebut.

1. *Fly ash* kelas C: diproduksi dari pembakaran batubara lignite atau sub-bituminous selain mempunyai sifat *pozzolanic* juga mempunyai sifat self-cementing (kemampuan untuk mengeras dan menambah *strength* apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. Biasanya mengandung kapur (CaO) >20%
2. *Fly ash* kelas F: merupakan *fly ash* yang diproduksi dari pembakaran batubara anthracite atau bituminous, mempunyai sifat *pozzolanic* dan untuk mendapatkan sifat cementitious harus diberi penambahan quick lime, hydrated lime, atau semen. *Fly ash* kelas F ini kadar kapurnya rendah (CaO) <10%.



Tabel 2.12 Komposisi kandungan mineral pada *fly ash*.

Nama Mineral Yang Dikandung	Persentase Suryalaya	Persentase Paiton
Silikon Dioksida (SiO_3)	55.29%	29.80%
Ferri Dioksida (Fe_2O_3)	1.84%	12%
Aluminium Trioksida (Al_2O_3)	31.68%	22.88%
Kalsium Oksida (CaO)	0.53%	17.36%
Magnesium Oksida (MgO)	0.47%	7.85%
Sulfur Trioksida (SO_3)	1.99%	4.31%
Kalium Oksida (K_2O)	0.28%	0.55%
Natrium Trioksida (Na_2O_3)	0.83%	-
Natrium Oksida (Na_2O)	-	2.32%
Titan Dioksida (TiO_2)	-	0.65%
Posfor Pentaoksida (P_2O_5)	-	0.32%
Hilang Pada Pemijaran	2.49%	2%
Kadar Air	2.10%	-

Sumber: Abadi (1998).



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

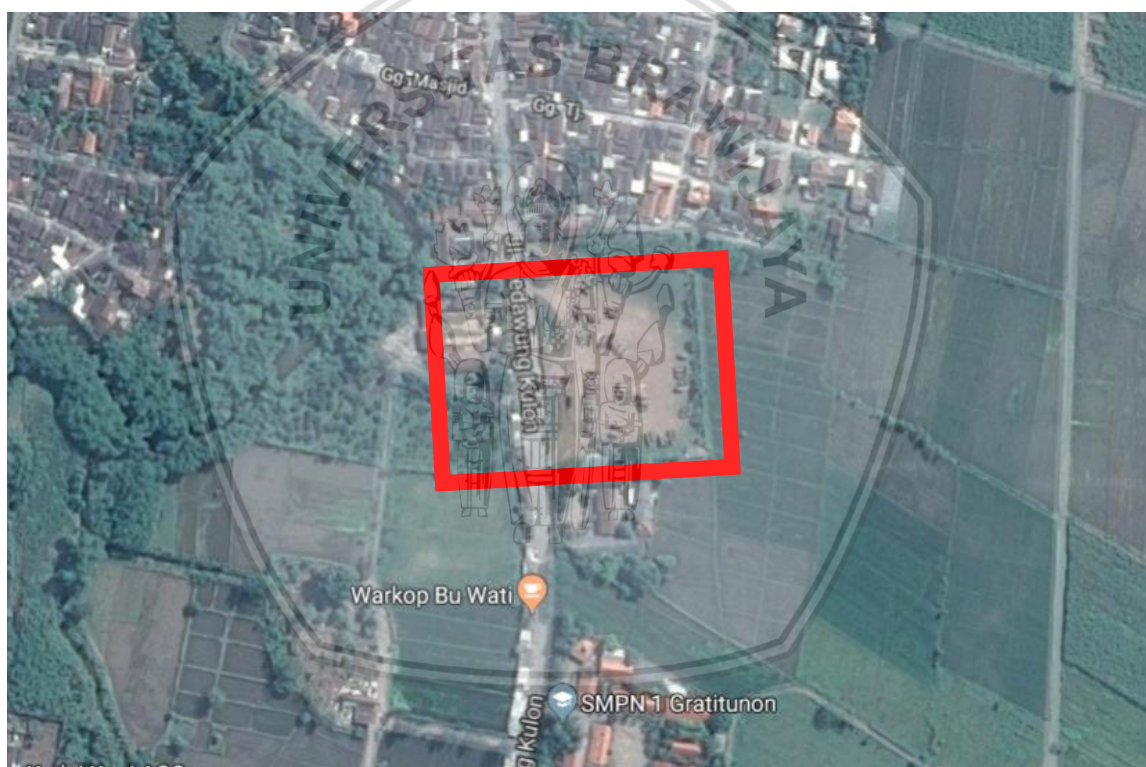
3.1. Rencana Penelitian

Waktu : Februari 2018 sampai dengan Juni 2018

Tempat : Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Tempat Pengambilan sampel tanah:

Sampel tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah lunak di desa Kedawung Kulon, Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Proyek PT. Adhi Karya



Gambar 3.1 Peta tempat pengambilan sampel tanah

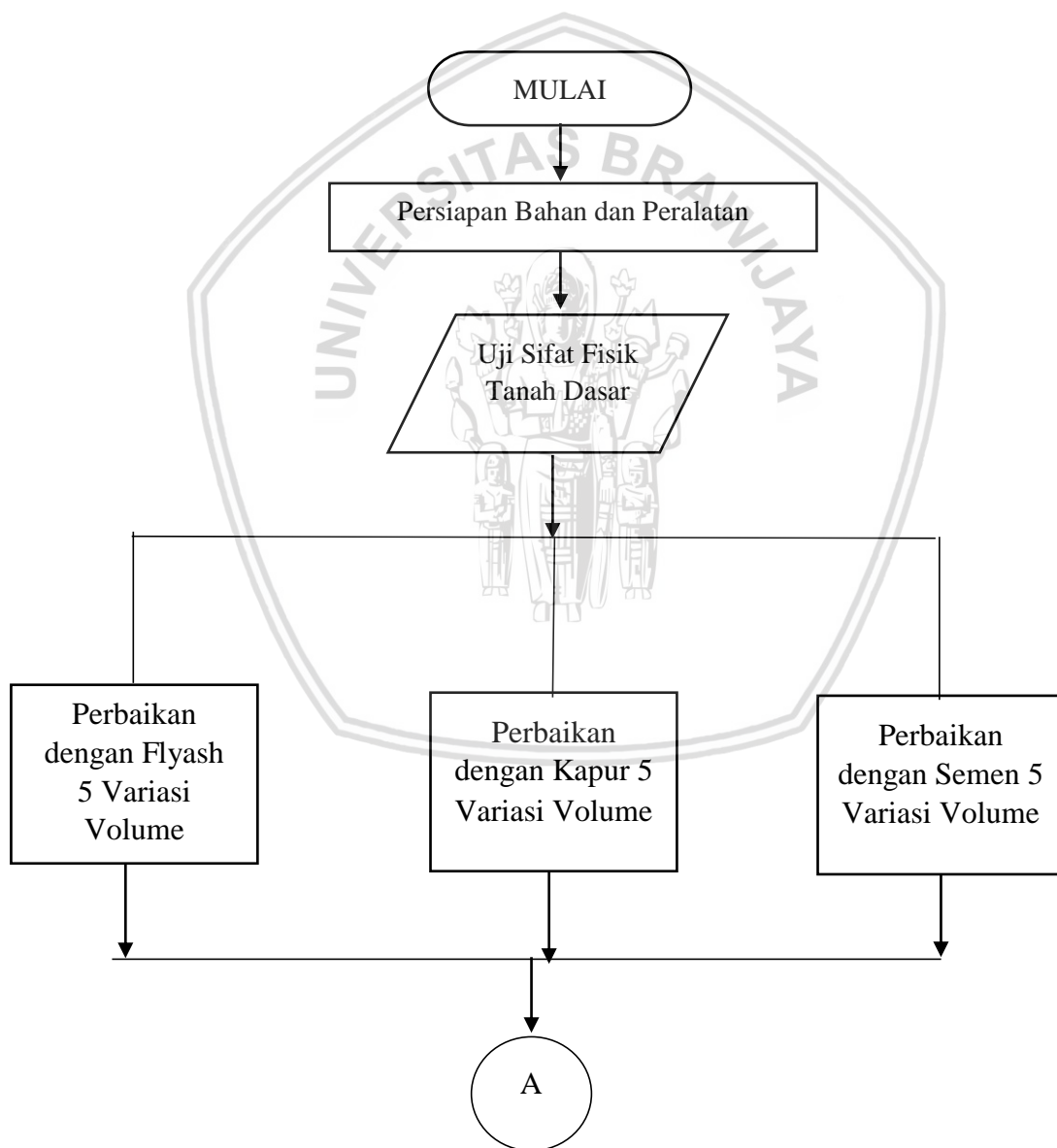
Pengambilan sampel tanah dilakukan dengan cara pengambilan *disturbed soil*. Percobaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

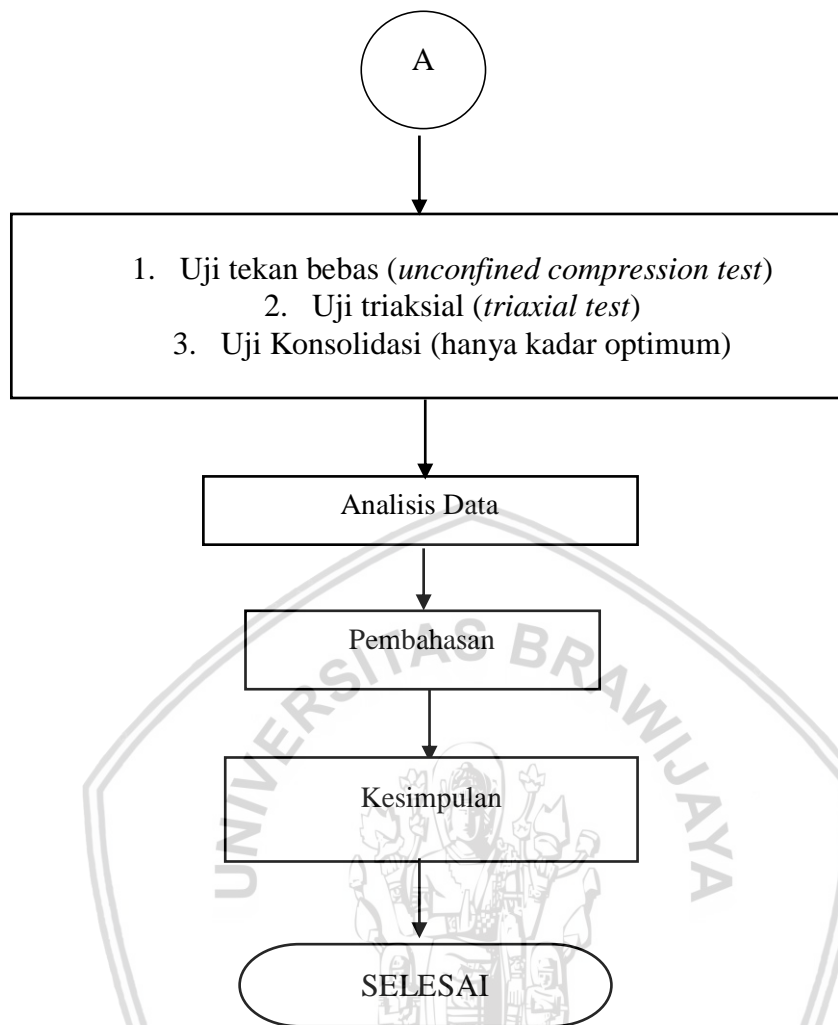
- Uji Triaksial (*Triaxial Unconsolidated Undrained*)
- Uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Strength*)
- Uji Konsolidasi

Bahan yang perlu disiapkan antara lain:

- a. Tanah lunak
- b. Semen Portland tipe 1
- c. Kapur
- d. *Fly ash* tipe C
- e. Air

3.2. Diagram Alir Penelitian





3.3. Pengujian

a) Pengujian Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan besarnya kekuatan tekan bebas tanah dan batuan yang bersifat kohesif dalam keadaan asli (*undisturbed*) maupun buatan (*remolded*)

Dilakukan uji unconfined dengan langkah – langkah sebagai berikut:

1. Siapkan benda uji berupa silinder kemudian timbang benda uji tersebut
2. Letakkan benda uji tersebut pada mesin tekan bebas
3. Atur jarum arloji pada angka nol
4. Lakukan pembacaan beban pada regangan 0,5; 1; dan 2% tiap menit, lakukan pembacaan hingga sample mengalami keruntuhan

b) Pengujian Triaksial (*Triaxial unconsolidated undrained*)

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk mengukur *unconsolidated undrained strength* terhadap sampel berbentuk silinderdari tanah kohesif, baik dalam keadaan undisturbed maupun remolded.

Dilakukan uji triaxial dengan langkah – langkah sebagai berikut :

1. Ambil sampel benda uji dari lapangan dengan tabung yang telah disediakan
2. Bungkus sampel tanah dengan membran, pasang juga karet pada ujung atas dan bawah sample
3. Tutupkan tabung triaxial, hubungkan dengan alat pengukur tegangan, lalu isi tabung tersebut dengan air hingga penuh
4. Arloji penunjuk beban dan arloji pengukur penetrasi diatur sampai menunjukkan angka nol
5. Berikan tekanan axial pada sampel tanah tersebut sebesar 0,5 – 1,5% per menit, dan catat beban dan perubahan-perubahan setiap 0,1; 0,3; 0,4; 0,5% (pada setiap 0,5% setelah dicapai 3% dan setiap 1% setelah 10% tegangan dan setiap 2% jika tekanan telah melebihi 10%)

c) Pengujian Konsolidasi

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan sifat pemadatan suatu jenis tanah.

Dilakukan uji konsolidasi dengan langkah – langkah sebagai berikut:

1. Benda uji dan cincin ditimbang dengan ketelitian 0,1 gram
2. Menempatkan batu pori di bagian atas dan bawah dari cincin sehingga benda uji yang sudah dilapisi kertas saringan terapat oleh kedua batu pori, lalu masukkan ke dalam sel konsolidasi.
3. Pasang alat penumpu di atas batu pori.
4. Meletakkan sel konsolidasi yang sudah terisi benda uji pada alat konsolidasi sehingga bagian yang runcing dari pelat penumpu menyentuh tepat pada alat pembebanan.
5. Atur kedudukan arloji kemudian dibaca dan dicatat.
6. Memasang beban pertama sehingga tekanan pada benda uji sebesar 0,25 kg/cm², kemudian arloji dibaca dan dicatat pada waktu yang telah ditentukan hingga mencapai 24 jam sejak beban pertama dipasang, sesuai formulir konsolidasi.

7. Lakukan hal yang sama pada beban kedua dan seterusnya.
Beban – beban tersebut akan menimbulkan tekanan normal terhadap benda uji masing – masing $0,25 \text{ kg/cm}^2$; $0,5 \text{ kg/cm}^2$; 1 kg/cm^2 ; 2 kg/cm^2 ; dan seterusnya.
8. Setelah selesai dengan semua beban, maka keluarkan cincin dan benda uji dari sel konsolidasi. Ambil batu pori dari permukaan atas dan bawah. Kerigkan permukaan atas dan bawah benda uji.
9. Mengeluarkan benda uji dari cincin kemudian timbang dan tentukan berat keringnya.

3.4. Analisa Data

Setelah melakukan pengujian di atas dan mendapatkan data yang diperlukan, maka diperoleh nilai tegangan runtuh (q_u), sudut geser (ϕ), kohesi (c), dan besar penurunan dengan uji *unconfined*, uji triaksial, dan uji konsolidasi.

3.5. Rancangan Penelitian

Tabel Hasil uji tekan bebas (*Unconfined compression test*)

No.	Kadar Additif	Tegangan Maksimum (kg/cm^2)	Cu (kg/cm^2)
1	3% kapur		
2	6% kapur		
3	9% kapur		
4	12% kapur		
5	15% kapur		
6	5% semen		
7	8% semen		
8	10% semen		
9	12% semen		
10	15% semen		
11	5% <i>fly ash</i>		
12	10% <i>fly ash</i>		
13	15% <i>fly ash</i>		
14	20% <i>fly ash</i>		
15	25% <i>fly ash</i>		

Tabel Hasil Uji Triaksial (*Triaxial Unconsolidated Undrained*)

No.	Kadar Additif	Φ (°)	c (kg/cm ²)
1	3% kapur		
2	6% kapur		
3	9% kapur		
4	12% kapur		
5	15% kapur		
6	5% semen		
7	8% semen		
8	10% semen		
9	12% semen		
10	15% semen		
11	5% fly ash		
12	10% fly ash		
13	15% fly ash		
14	20% fly ash		
15	25% fly ash		

Tabel Hasil Uji Konsolidasi

Jenis Sampel	Cc	Cv	Penurunan	
			Sc (m)	t (tahun)
Tanah asli				
Tanah asli + kapur 6%				
Tanah asli + semen 10%				
Tanah asli + fly ash 15%				

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan menguraikan dan membahas tentang hasil penelitian yang diperoleh dari uji yang telah dilakukan di laboratorium mekanika tanah, Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Sampel yang diuji merupakan tanah lunak yang diambil dari Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur.

Adapun jenis pengujian yang dilakukan yaitu uji kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*) dan uji triaksial (*Triaxial Unconsolidated Undrained*) dengan variasi kadar zat aditif dengan metode *shallow soil mixing* yang telah ditentukan dengan kadar air optimum yang telah diperoleh dari penelitian sebelumnya, serta uji konsolidasi dengan kadar air dan kadar zat aditif optimum.

Perbaikan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan campuran kapur, semen, dan *fly ash* dengan perbedaan kadar yang telah ditentukan dari penelitian pendahuluan untuk mengetahui pengaruh yang diberikan pada setiap kadar tambahan zat aditif yang diberikan.

4.1 Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan telah dilakukan oleh Putri A.R.D. dan Zaika (2018) untuk mengetahui sifat fisik tanah asli yang akan digunakan pada penelitian ini. Adapun salah satu pengujian pendahuluan tersebut adalah uji klasifikasi tanah. Dari pengujian kadar air didapatkan kadar air tanah asli sebesar 50,51%.

Sedangkan pengujian pendahuluan lainnya yang dilakukan oleh Firdaus R.N. dan Zaika (2018) bertujuan untuk mendapatkan kadar kapur optimum serta kadar air optimum dari 5 (lima) variasi kadar kapur yaitu 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Dari hasil uji pemadatan serta uji CBR kelima kadar tersebut didapat kadar optimum kapur 6%.

Untuk *fly ash* menggunakan hasil dari penelitian sebelumnya oleh Fathurrahman dan Zaika (2018) bertujuan untuk mendapatkan kadar *fly ash* optimum serta kadar air optimum dari 5 (lima) variasi kadar *fly Ash* yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Yang diperoleh kadar *Flyash* optimum 15%.

Untuk semen menggunakan hasil dari penelitian sebelumnya oleh Fahara dan Zaika (2018) bertujuan untuk mendapatkan kadar *fly Ash* optimum serta kadar air optimum dari 5 (lima) variasi kadar *fly Ash* yaitu 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%. memperoleh hasil untuk kadar optimum campuran semen sebesar 10%.

4.1.1 Pembacaan Data SPT

Pengujian yang dilakukan dengan pengeboran tanah untuk mengetahui bagaimana perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan tanah dalam kondisi terganggu dengan teknik penumbukan. Dari pengujian SPT, dapat diketahui jenis tanah yang sedang diuji dengan menggunakan tabel seperti pada tabel 4.1.

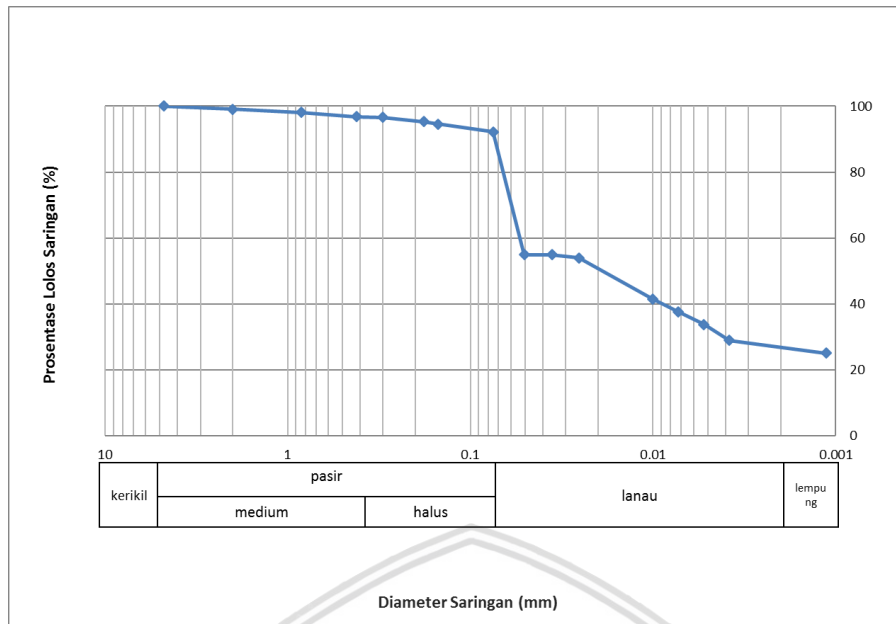
Tabel 4.1 Pengelompokan jenis tanah berdasarkan hasil SPT

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

Dari uji SPT yang telah dilaksanakan oleh pihak PT. Adhi Karya seperti pada lampiran, didapatkan nilai NSPT dengan rentang 1-9 yang dimana ketika dihubungkan dengan tabel penentuan jenis tanah menurut data SPT (**tabel 4.1**), maka dapat diketahui bahwa tanah yang digunakan pada penelitian ini berjenis tanah lunak. Tanah lunak ditemukan pada kedalaman 1 sampai 15,5 m.

4.1.2 Uji Analisis Butiran

Uji analisis butiran dibagi menjadi dua bagian pengujian, yaitu uji analisis saringan dan uji analisis hidrometer. Analisis hidrometer berperan dalam menentukan distribusi ukuran butiran tanah yang mengandung butir tanah lolos saringan no. 200. Sedangkan uji analisis saringan untuk menentukan distribusi ukuran butir tanah yang tertahan saringan no. 200. Sampel yang diuji termasuk kedalam tanah lempung, maka akan cukup sulit dalam proses pengayakan, oleh karena itu dilakukan uji analisis saringan basah (*Wet Sieve Analysis*) agar hasil pembagian butiran semakin valid. Hasil dari analisis saringan dan hidrometer disajikan dalam satu grafik dapat dilihat pada Gambar 4.1 :



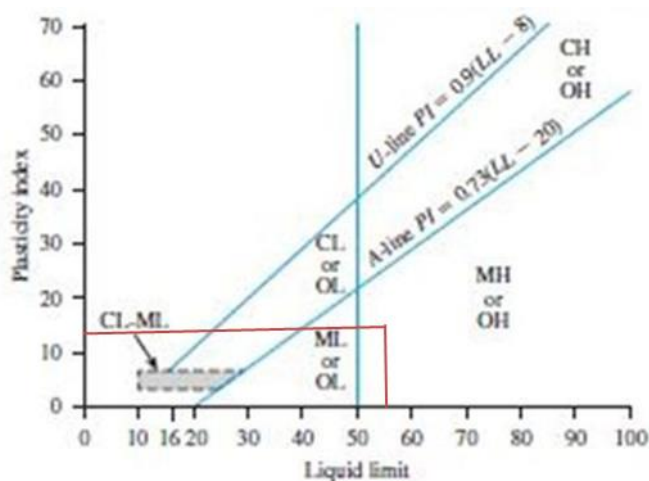
Sumber : Putri ARD dan Zaika (2018)

Gambar 4.1 Analisis saringan dan hidrometer

Dari Gambar 4.1 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.

4.1.3 Sistem Klasifikasi Tanah Sistem *Unified*

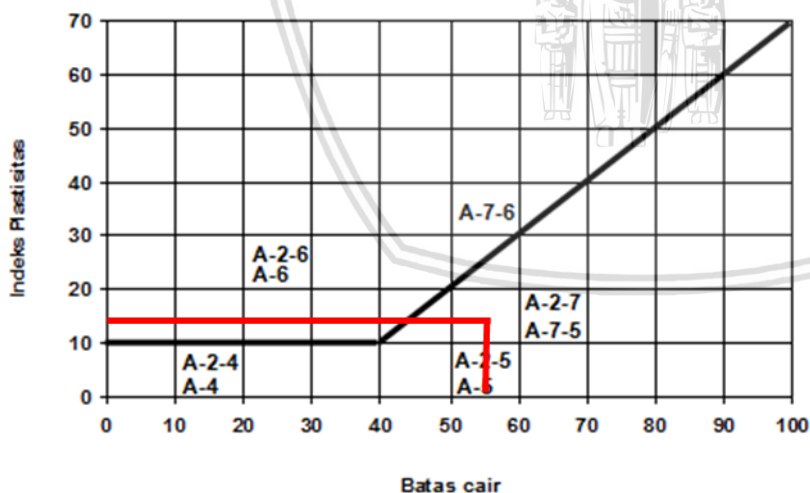
Berdasarkan sistem klasifikasi tanah sistem *unified* yang sudah diplotkan pada Gambar 4.2, tanah lempung dari Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan ini tergolong sebagai tanah MH atau OH (lempung organik). Hasil ini didapatkan karena melihat dari hasil analisis butiran dengan persentase distribusi lolos saringan no. 200 sebesar 92,25% maka tanah tersebut merupakan tanah berbutir halus dan dilihat dari batas-batas atterberg tanah ini memiliki batas cair (*liquid limit*) sebesar 56,12%, batas plastis (*plastic limit*) sebesar 43,36%, batas susut (*shrinkage limit*) sebesar 11,863 %, maka tanah ini mempunyai indeks plastisitas sebesar 12,76%.



Gambar 4.2 Klasifikasi Tanah USCS

4.1.4 Sistem Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

Berdasarkan sistem klasifikasi tanah sistem *American Assosiation of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) yang sudah diplotkan pada **Gambar 4.3**, tanah lunak dari Kecamatan Grati, Kabupaten Pasuruan ini memiliki nilai Liquid Limit (LL) = 56,12 %, Indeks Plastisitas (PI) = 12,76%, serta lolos saringan no.200 lebih dari 35% seluruh tanah yakni sebanyak 92,25%, maka tanah tersebut termasuk ke dalam golongan tanah berlempung (A-7-5).



Gambar 4.3 Klasifikasi 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 dilakuan 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). Unuk kapur dan *flyash* berdasarkan tabel dari ingles dan Metcalf, 1972 cocok untuk jenis tanah lunak lempung.

4.1.5 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 additif 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 4.2*.

Tabel 4.2 Hasil Kadar air optimum dan berat isi maksimum dari tiap kadar additif

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% <i>Fly Ash</i>	25.70	1.47	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 10% <i>Fly Ash</i>	25.90	1.48	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 15% <i>Fly Ash</i>	25.80	1.49	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 20% <i>Fly Ash</i>	25.40	1.50	Fathur dan Zaika
Tanah asli + 25% <i>Fly Ash</i>	25.90	1.49	Fathur dan Zaika

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

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 additif. Serta Uji Konsolidasi dengan kadar air dan kadar zat additif optimum saja.

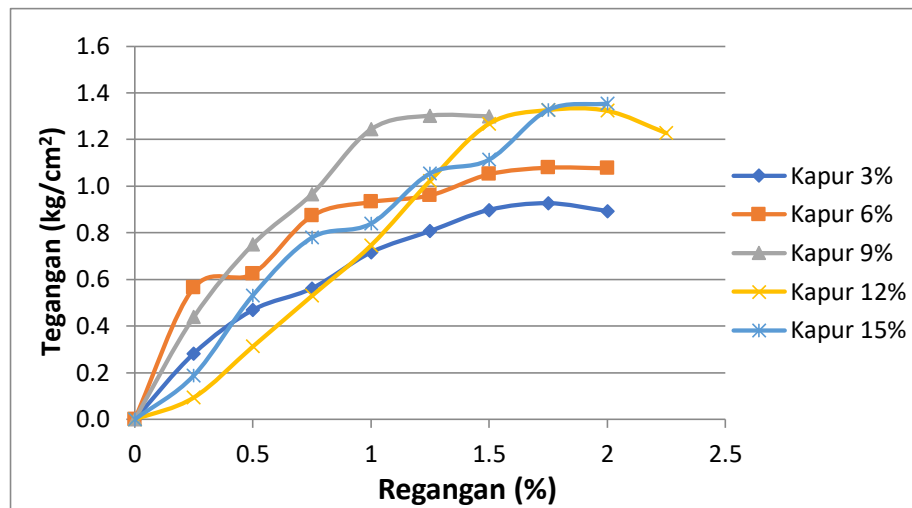
4.2.1 Pengujian Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression Test*)

Uji kuat tekan bebas merupakan uji kekuatan tanah dengan tekanan satu arah. Kuat tekan bebas adalah besarnya beban aksial persatuan luas pada saat benda uji mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial mencapai 15%. Uji ini menghasilkan hubungan antara tegangan aksial tekan dengan regangan.

Benda uji yang digunakan pada pengujian kuat tekan bebas merupakan tanah lunak dengan variasi kadar campuran kapur, semen, dan fly ash dengan. dibentuk secara *remolded* dari metode *shallow soil mixing* yang sudah dipadatkan dengan kadar air optimum (OMC) serta diberi perlakuan 1 (satu) hari atau 24 jam waktu perawatan (*curing*). Ketentuan campuran zat additif berdasarkan penelitian pendahuluan dengan masing-masing kadar 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.

4.2.1.1 Campuran Tanah dan Kapur

Pada kondisi pengujian ini sampel diberi perlakuan yang sama melalui proses curing selama 24 jam seperti penelitian sebelumnya agar mendapat hasil yang relevan. Adapun variasi kadar kapur yang akan diuji yaitu 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Hasil perbandingan tegangan dan regangan tanah dengan variasi kadar kapur dapat dilihat pada Gambar 4.4.

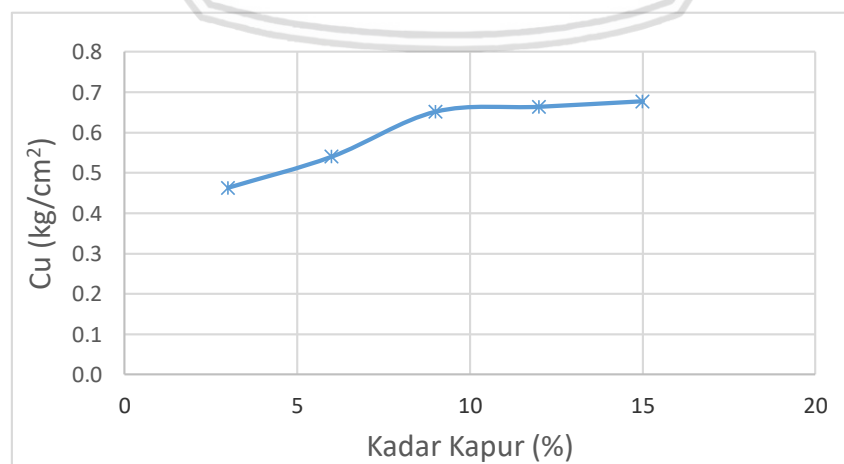


Gambar 4.4 Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar kapur

Hasil pengujian kuat tekan bebas dari **Gambar 4.4** 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. Untuk nilai q_u dan C_u yang didapat dari percobaan tersebut dijelaskan pada tabel 4.3 dan Gambar 4.5 berikut:

Tabel 4.3 Perbandingan q_u dan C_u dari variasi kadar kapur

No.	Kadar kapur (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	C_u (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

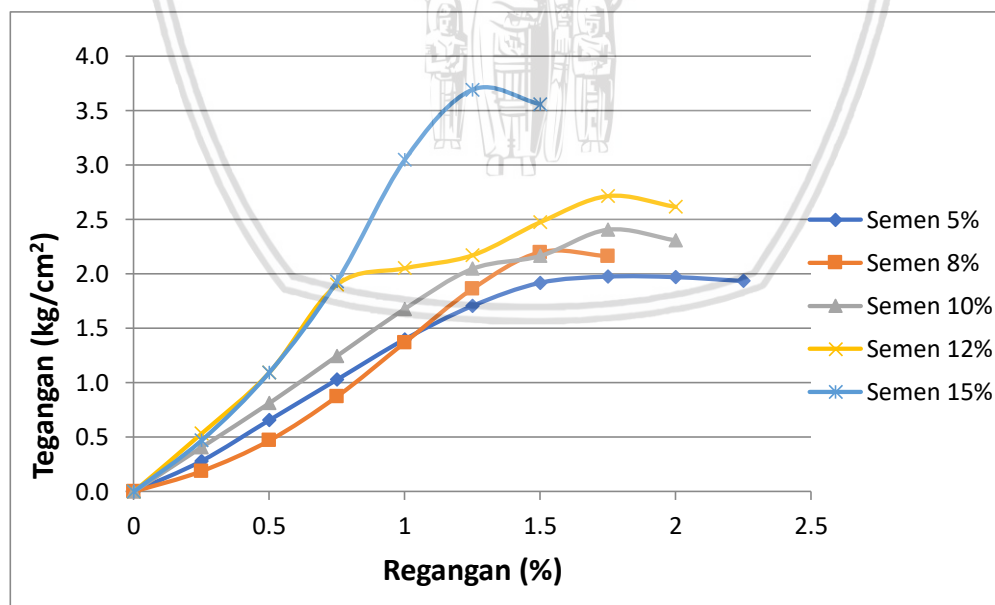


Gambar 4.5 Pengaruh kadar kapur terhadap C_u

Pengaruh kadar kapur dari Gambar 4.5 dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar zat aditif 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%.

4.2.1.2 Campuran Tanah dan Semen

Pengujian tanah dengan semen dilakukan karena semen portland banyak digunakan untuk stabilisasi tanah sejak dulu maka disini dilakukan pula penelitian menggunakan bahan campuran stabilisasi dengan semen agar dapat membandingkan bahan aditif mana yang akan menghasilkan nilai tegangan runtuh maksimum. Adapun variasi kadar semen yang akan diuji yaitu 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%. Hasil perbandingan tegangan dan regangan tanah dengan variasi kadar semen dapat dilihat pada Gambar 4.6.

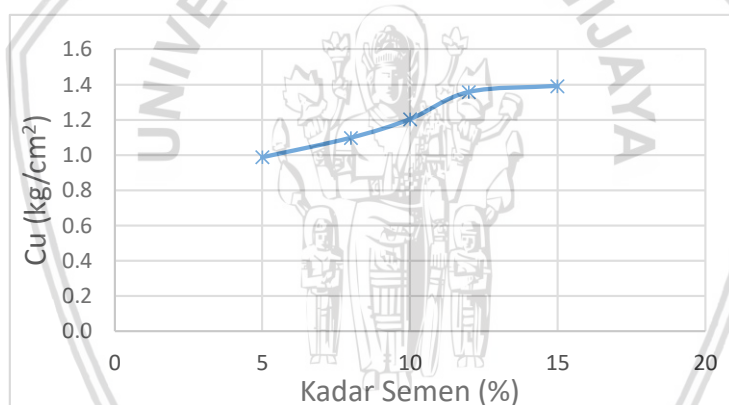


Gambar 4.6 Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar semen

Hasil pengujian kuat tekan bebas dari Gambar 4.6 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. Untuk nilai q_u dan C_u yang didapat dari percobaan tersebut dijelaskan pada tabel 4.4 dan Gambar 4.7 berikut:

Tabel 4.4 Perbandingan q_u dan C_u dari variasi kadar semen

No.	Kadar semen (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm^2)	C_u (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

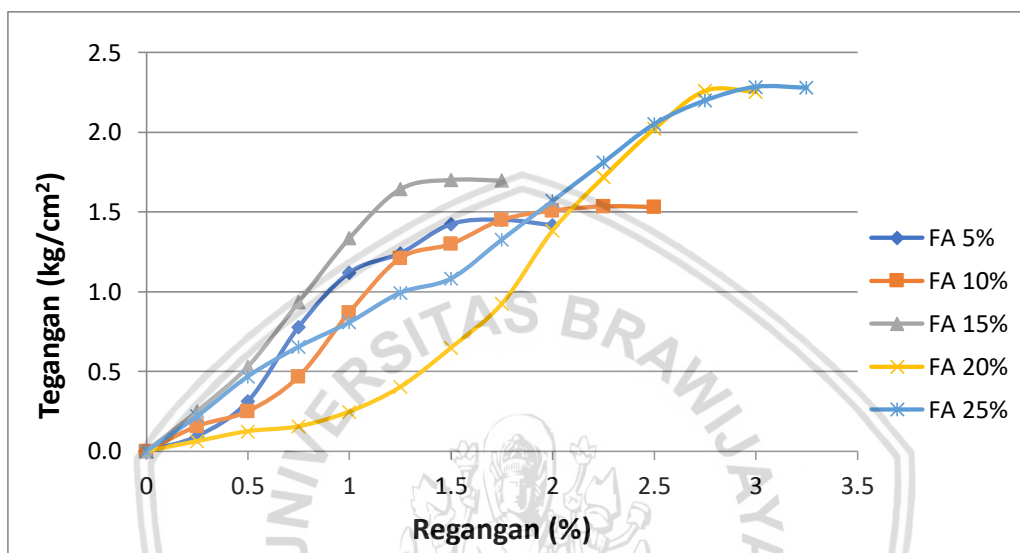


Gambar 4.7 Pengaruh kadar semen terhadap C_u

Pengaruh kadar semen dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa semakin tinggi kadar semen maka nilai C_u 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 C_u terbesar terjadi saat kadar semen 10% yaitu sebesar 15%.

4.2.1.3 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 4.8

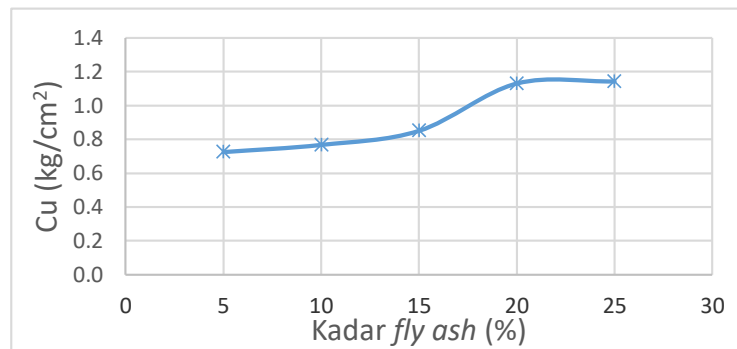


Gambar 4.8 Perbandingan tegangan-regangan tanah lunak dengan variasi kadar *fly ash*

Hasil pengujian kuat tekan bebas dari **Gambar 4.8** 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 C_u yang didapat dari percobaan tersebut dijelaskan pada tabel 4.5 dan Gambar 4.9 berikut.

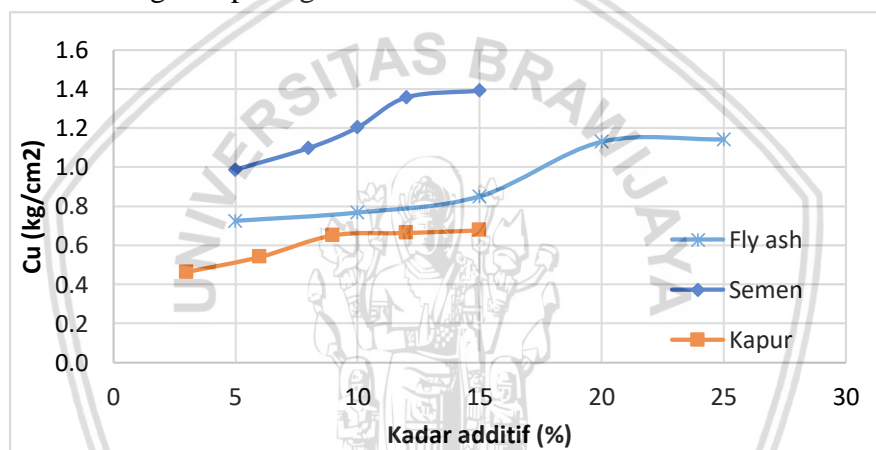
Tabel 4.5 Perbandingan q_u dan C_u dari variasi kadar *fly ash*

No.	Kadar <i>fly-ash</i> (%)	Tegangan Maksimum (kg/cm ²)	C_u (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



Gambar 4.9 Pengaruh kadar fly ash terhadap Cu

Pengaruh kadar fly ash dari Gambar 4.9 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 4.10.



Gambar 4.10 Pengaruh kadar additif (%) terhadap Cu (kg/cm²)

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

Uji triaksial dimaksudkan untuk mencari parameter kuat tegangan geser dan kohesi. Pengukuran dilakukan dengan memberikan tekanan vertikal, selama pemberian tekanan vertikal ini bisa dilihat saat terjadi keruntuhan tanah yaitu pada saat pembacaan proving ring maksimum. Hasil akhir dari uji triaksial adalah nilai sudut geser (ϕ) dan kohesi (c).

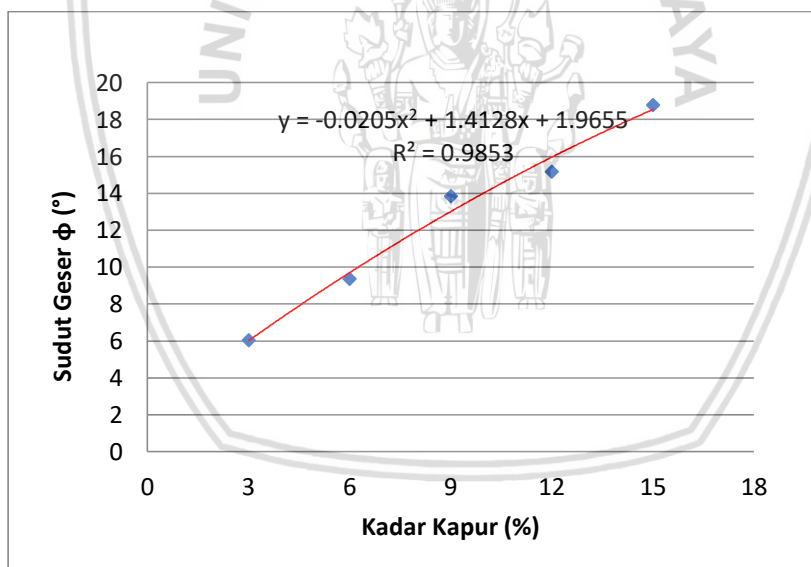
Benda uji yang digunakan pada pengujian triaksial merupakan tanah lunak dengan variasi kadar campuran kapur, semen, dan fly ash dengan dibentuk secara *remolded* dari metode *shallow soil mixing* yang sudah dipadatkan dengan kadar air optimum (OMC) serta diberi perlakuan 1 (satu) hari atau 24 jam waktu perawatan (*curing*). Ketentuan campuran zat additif berdasarkan penelitian pendahuluan dengan masing-masing kadar 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.

4.2.2.1 Campuran Tanah dan Kapur

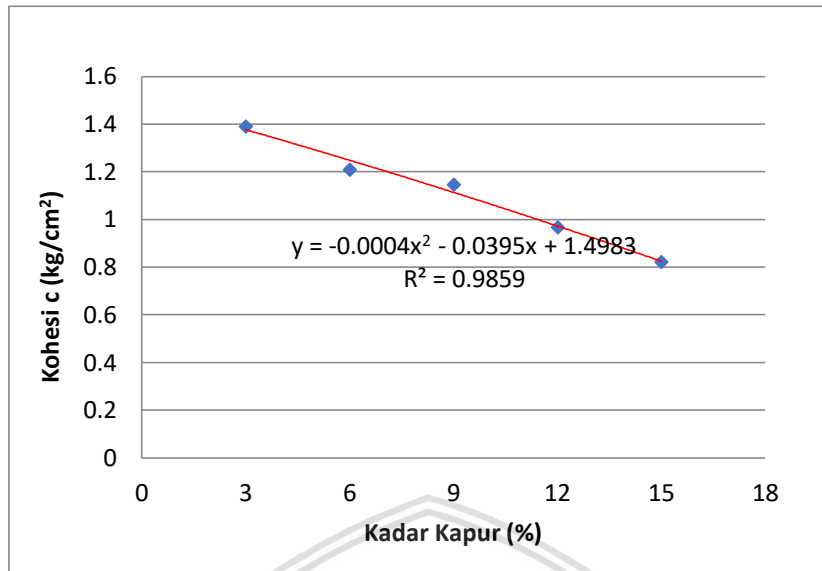
Benda uji yang diujikan untuk uji triaksial ini sama dengan benda uji *unconfined* yaitu benda uji tanah asli yang dicampur dengan berbagai variasi kadar kapur. Variasi kadar kapur sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Hasil perbandingan sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar kapur dapat dilihat pada tabel 4.6, Gambar 4.10, dan Gambar 4.11

Tabel 4.6 Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar kapur

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



Gambar 4.11 Grafik hubungan kadar kapur terhadap sudut geser (Φ)



Gambar 4.12 Grafik hubungan kadar kapur terhadap nilai koehesi (c)

Sudut geser untuk tanah dengan campuran kadar kapur 3% memiliki nilai yang paling rendah yaitu 6,041°, Peningkatan sudut geser juga terlihat pada Gambar 4.10 secara signifikan hingga tertinggi pada tanah dengan campuran kadar kapur 15% yaitu sebesar 18,789°. Dapat dilihat pada Gambar 4.11, nilai koehesi (c) maksimum berada pada kadar kapur sebesar 3% dengan nilai koehesi 1,39. Nilai koehesi terjadi penurunan seiring bertambahnya kadar kapur.

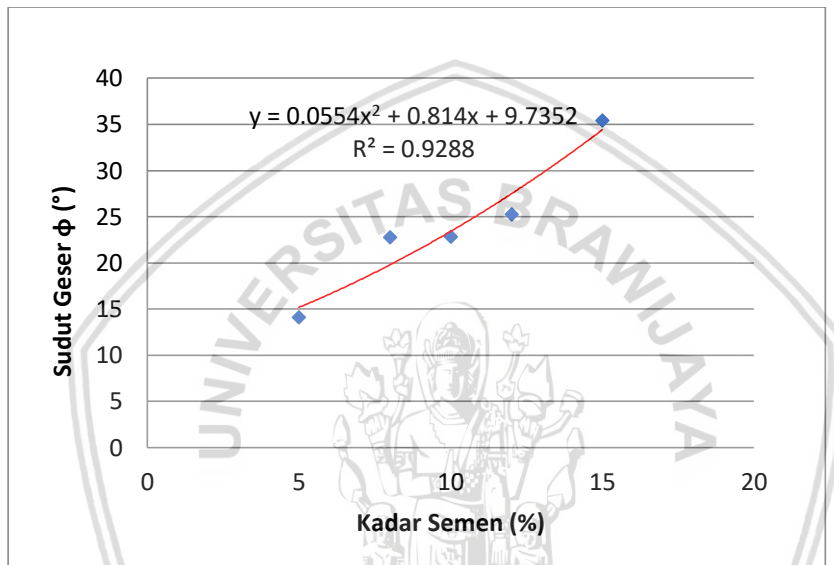
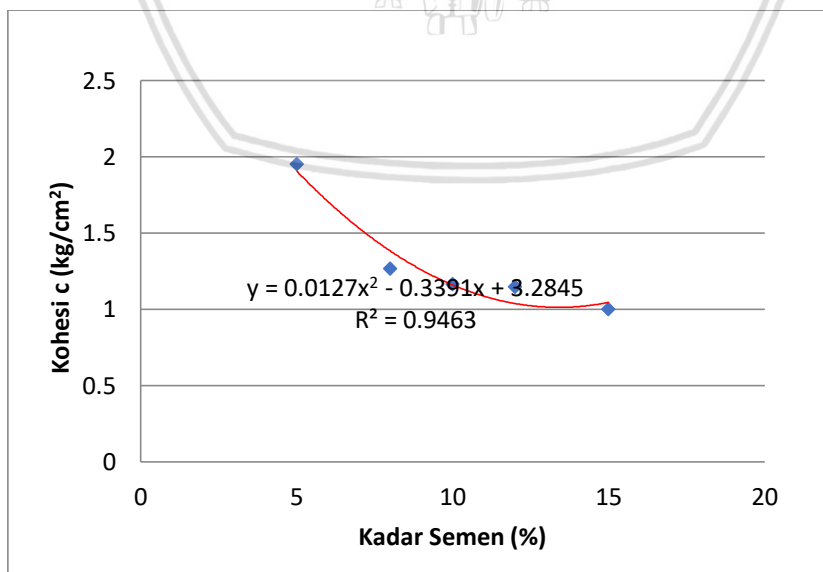
4.2.2.2 Campuran Tanah dan Semen

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 koehesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar semen dapat dilihat pada tabel 4.6 dan Gambar 4.12 dan Gambar 4.13.



Tabel 4.7 Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar semen

No	Kadar Semen (%)	Kadar air (%)	Φ (°)	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

Gambar 4.13 Grafik hubungan kadar semen terhadap sudut geser (Φ)Gambar 4.14 Grafik hubungan kadar semen terhadap nilai kohesi (c)

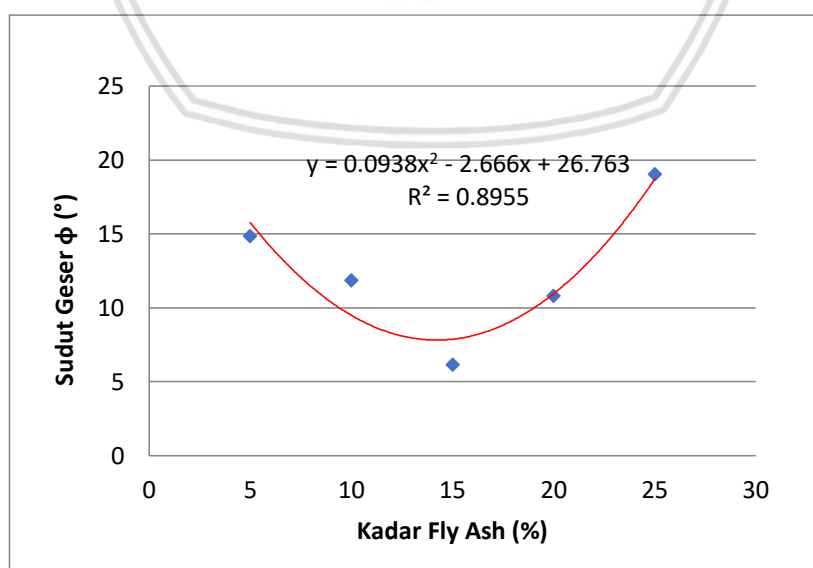
Sudut geser untuk tanah dengan campuran kadar semen 5% memiliki nilai yang paling rendah yaitu $14,085^\circ$. Peningkatan sudut geser (Φ) juga terlihat pada Gambar 4.12 secara signifikan hingga tertinggi pada tanah dengan campuran kadar semen 15% yaitu sebesar $35,411^\circ$. Dapat dilihat pada Gambar 4.11, nilai kohesi (c) maksimum berada pada kadar semen sebesar 5% dengan nilai kohesi 1,951. Nilai kohesi terjadi penurunan seiring bertambahnya kadar semen.

4.2.2.3 Campuran Tanah dan *fly ash*

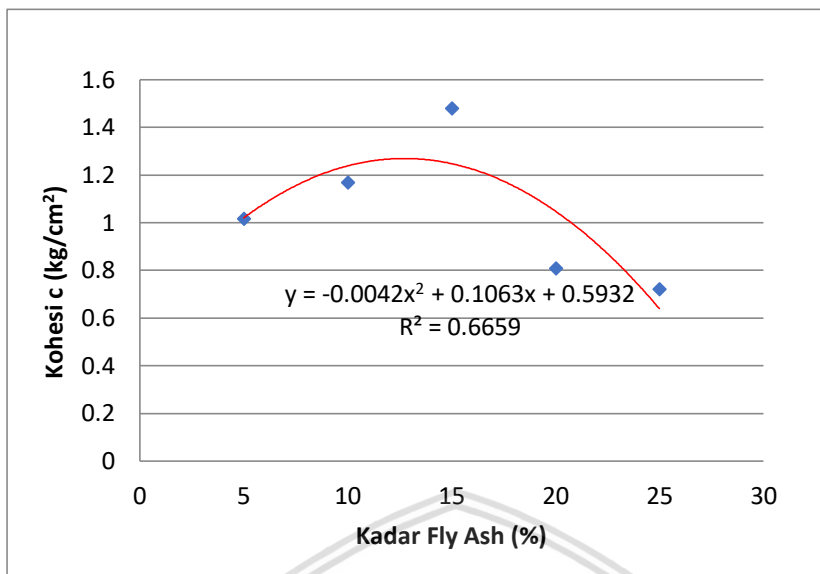
Sampel yang diujikan untuk uji triaksial yaitu benda uji tanah asli yang dicampur dengan variasi kadar *fly ash*. Variasi kadar *fly ash* sudah ditetapkan dari penelitian pendahuluan yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Hasil perbandingan sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) untuk tanah dengan variasi kadar semen dapat dilihat pada tabel 4.8 dan Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.

Tabel 4.8 Hasil sudut geser (ϕ) dan kohesi (c) dengan variasi kadar *fly ash*

No	Kadar <i>Fly Ash</i> (%)	Φ ($^\circ$)	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



Gambar 4.15 Grafik hubungan kadar *fly ash* terhadap sudut geser (Φ)



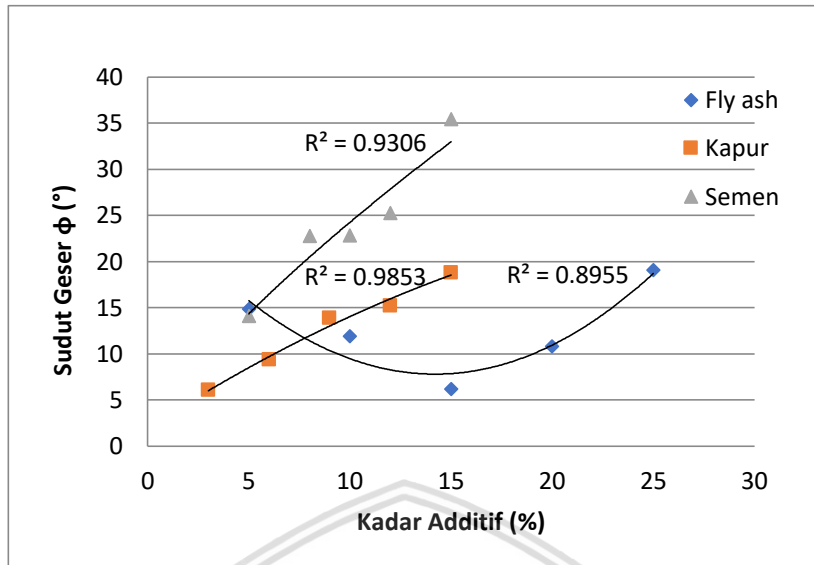
Gambar 4.16 Grafik hubungan kadar *fly ash* terhadap nilai kohesi (c)

Dapat dilihat pada grafik Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 bahwa bentuk grafik dari sudut geser (Φ) dan 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 $6,174^\circ$. Sudut geser (Φ) tertinggi pada tanah dengan campuran kadar *fly ash* 25% yaitu sebesar $19,062^\circ$. Dapat dilihat pada Gambar 4.11, nilai kohesi (c) maksimum atau puncak berada pada kadar *fly ash* sebesar 15% dengan nilai kohesi 1,479.

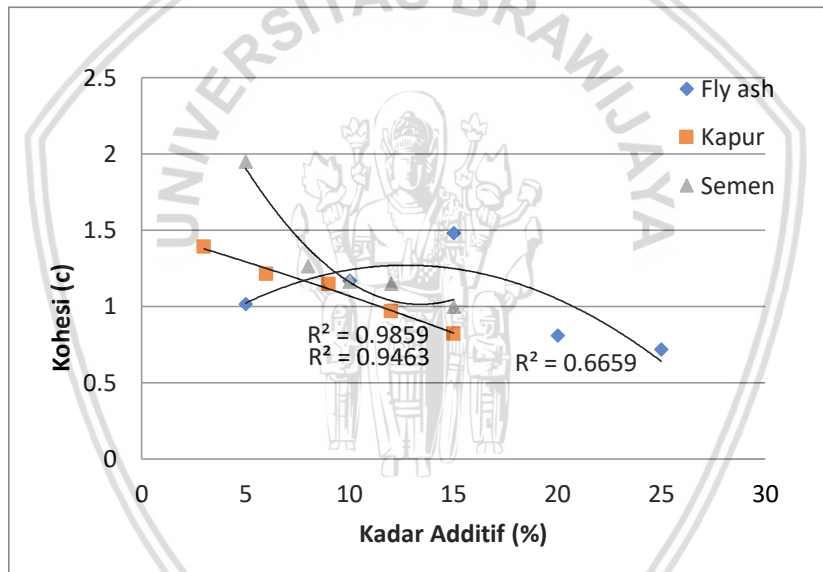
Kohesi adalah gaya tarik menarik antara partikel yang sejenis, kohesi dipengaruhi oleh kerapatan dan jarak antarpartikel dalam tanah. Untuk keadaan tanah campuran *fly ash* yaitu kadar 15% memiliki nilai kohesi yang paling tinggi dikarenakan gaya tarik menarik antar partikel tinggi, dalam keadaan kadar *fly ash* optimum ini tanah memiliki kerapatan atau kepadatan yang paling maksimum disbanding 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 4.17 dan Gambar 4.18:



Gambar 4.17 Grafik hubungan kadar additif terhadap sudut geser Φ



Gambar 4.18 Grafik hubungan kadar additif terhadap nilai koheesi (c)

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 (Cc) dan Koefisien Konsolidasi (Cv).

Benda uji yang digunakan pada pengujian konsolidasi merupakan tanah lunak dengan variasi kadar campuran kapur, semen, dan *fly ash* dengan dibentuk secara *remolded* dari metode *shallow soil mixing* yang sudah dipadatkan dengan kadar air optimum (OMC) serta diberi perlakuan 1 (satu) hari atau 24 jam waktu perawatan (*curing*) dengan ketentuan uji konsolidasi standar yaitu berukuran diameter 6 cm dan tinggi sampel 1 cm.

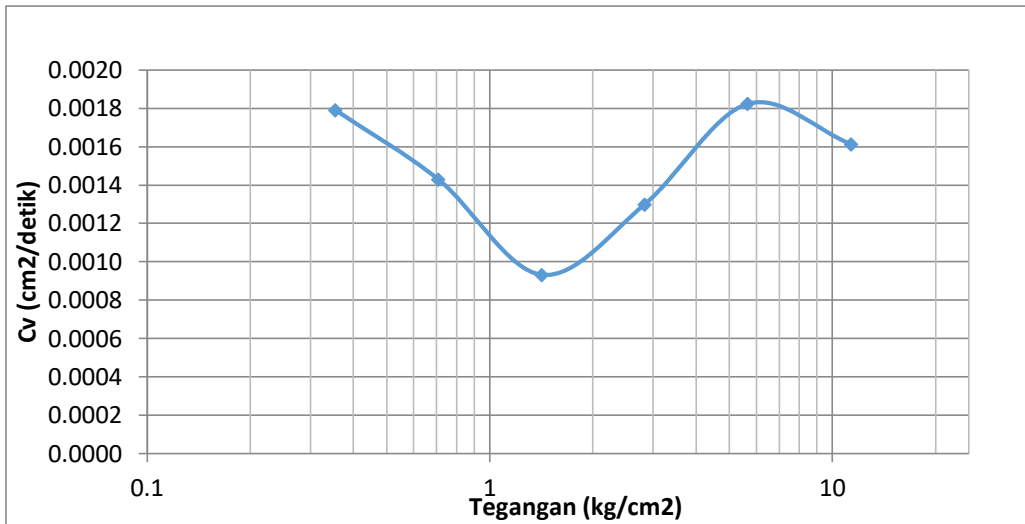
Ketentuan campuran zat additif berdasarkan pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*) dengan nilai tegangan maksimum runtuh (q_u) dan nilai C_u yang paling besar kenaikannya ditetapkan kadar 6% untuk kapur, 10% untuk semen, dan 15% untuk *fly ash* dari berat total campuran.

4.2.3.1 Konsolidasi campuran tanah dan kapur

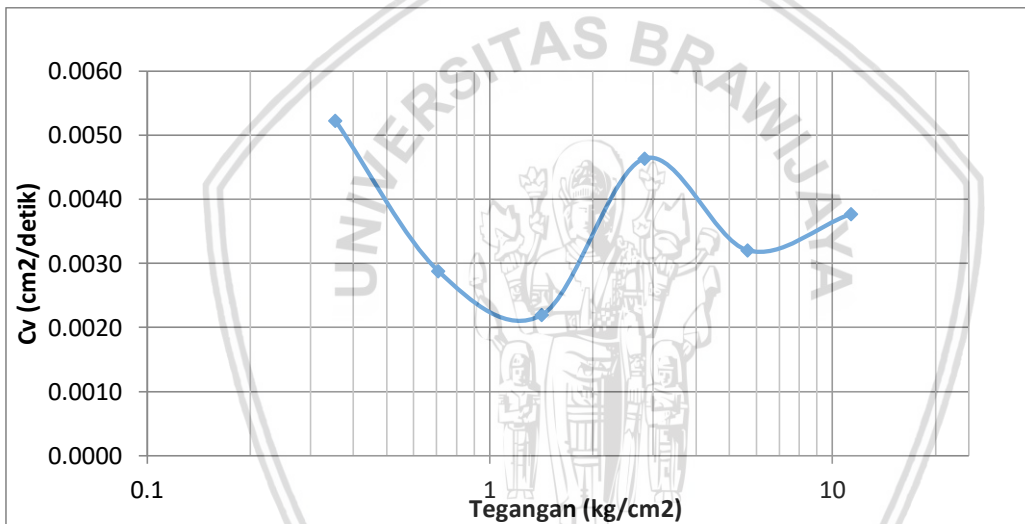
Benda uji yang digunakan untuk uji konsolidasi dengan kapur sesuai dengan ketentuan standar konsol yaitu berukuran diameter 6 cm dan tinggi 1 cm. Untuk kadar yang digunakan sesuai dengan hasil uji kuat tekan bebas yang menghasilkan nilai C_u yang besar kadar kenaikannya untuk kadar kapur yaitu dengan 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:

Tabel 4.9 Hasil C_v dengan Akar Waktu t_{90} dan Log Waktu t_{50} konsol kapur

Tegangan (kg/cm^2)	C_v (t_{90})	C_v (t_{50})
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



Gambar 4.19 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol kapur



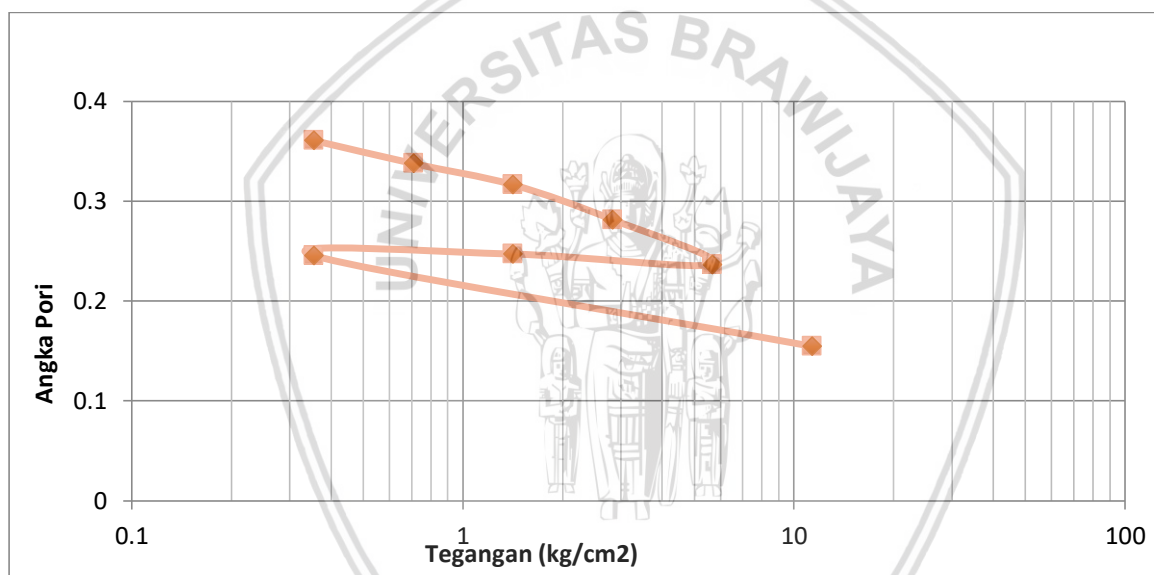
Gambar 4.20 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol kapur

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 4.10.



Tabel 4.10 Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori konsol kapur

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



Gambar 4.21 Hubungan antara tegangan dan angka pori konsol kapur

Dari tabel 4.10, dapat dihitung besarnya nilai C_c dengan cara:

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{0.338 - 0.316}{\log \frac{2.829}{1.415}} \\
 &= 0.073
 \end{aligned}$$

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

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

Void ratio sebelum pembebanan, $e_0 = 0,452$

Tegangan efektif *overburden*, $\sigma_0' = (7,75) \times (12,472 - 10) = 19,158 \text{ kN/m}^2$

Sehingga diperoleh besarnya penurunan:

$$\begin{aligned}
 S_c &= \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma'}{\sigma_0'} \right) \\
 &= \frac{0,0945 \times 15,5}{1 + 0,452} \log \left(\frac{19,158 + 30}{19,158} \right) \\
 &= 0,413 \text{ m}
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

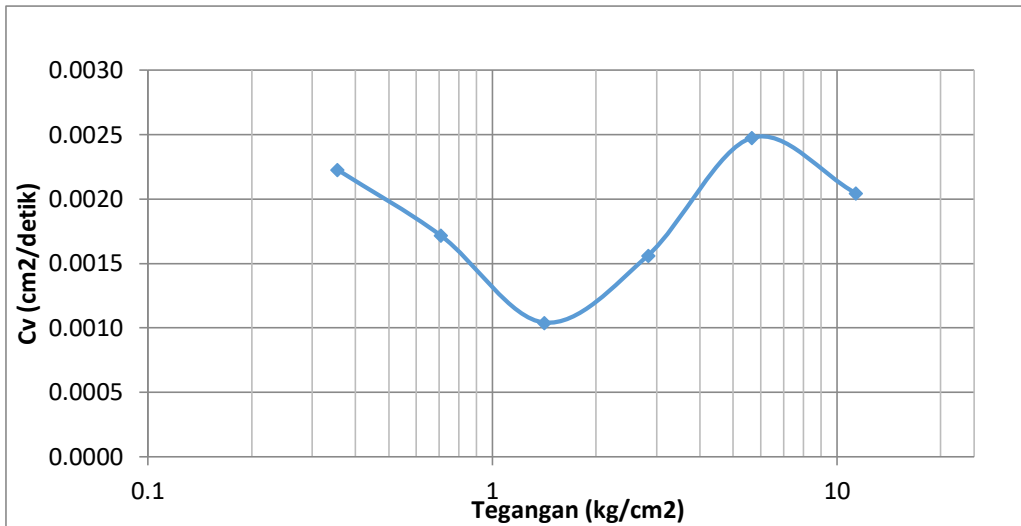
Jadi, konsolidasi yang terjadi sebesar 0,413 m dalam waktu tempuh 3,0375 tahun. Apabila dibandingkan dengan konsolidasi tanah asli yang telah dilakukan oleh Putri dan Zaika (2018) didapat penurunan akibat konsolidasi sebesar 2,65 m dengan waktu tempuh selama 25,7 tahun maka, perbaikan tanah menggunakan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

4.2.3.2 Konsolidasi campuran tanah dan semen

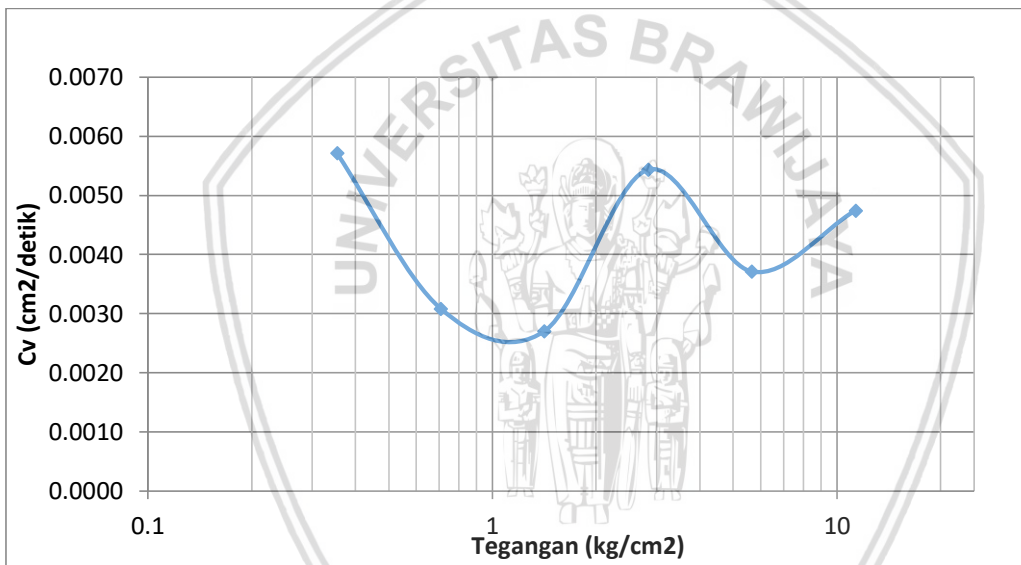
Benda uji yang digunakan untuk uji konsolidasi dengan semen sesuai dengan ketentuan standar konsol yaitu berukuran diameter 6 cm dan tinggi 1 cm. Untuk kadar yang digunakan sesuai dengan hasil uji kuat tekan bebas yang menghasilkan nilai C_u yang besar kadar kenaikannya untuk kadar semen yaitu dengan kadar 10% dengan nilai C_u 1,204 dengan kenaikan sebesar 15%. Hasil pengujian konsolidasi dengan campuran tanah dengan semen dengan semen 10% dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.19 Hasil C_v dengan Akar Waktu t_{90} dan Log Waktu t_{50} konsol semen

Tegangan (kg/cm^2)	C_v (t_{90})	C_v (t_{50})
0,354	0.00572	0.00223
0,707	0.00308	0.00172
1,415	0.00270	0.00104
2,829	0.00544	0.00156
5,659	0.00371	0.00247
11,318	0.00475	0.00205



Gambar 4.22 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol semen



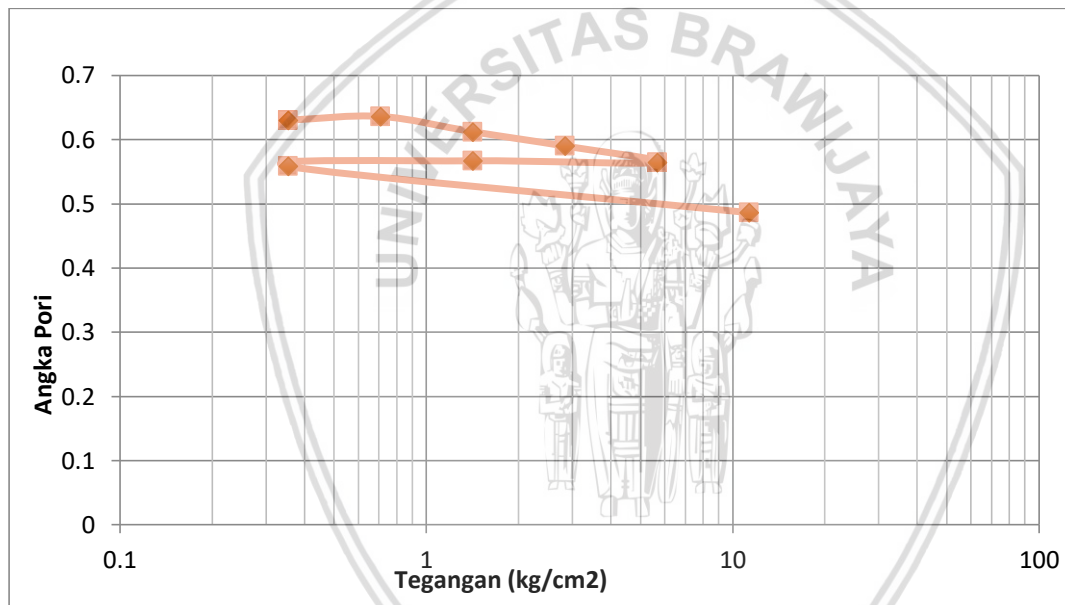
Gambar 4.23 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol semen

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 4.12.



Tabel 4.12 Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori

Tegangan (kg/cm ²)	Konsolidasi ΔH (cm)	Angka Pori $e = e_0 - \Delta e$
0,000	0,000	0.825
0.354	0.107	0.630
0.707	0.104	0.636
1.415	0.117	0.612
2.829	0.129	0.590
5.659	0.143	0.564
1.415	0.142	0.567
0.354	0.146	0.558
11.318	0.186	0.486



Gambar 4.24 Hubungan antara tegangan dan angka pori konsol semen

Dari **tabel 4.12**, dapat dihitung besarnya nilai C_c dengan cara:

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{0.590 - 0.564}{\log \frac{2.829}{1.415}} \\
 &= 0,085
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Cc &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_4 - e_5}{\log \frac{\sigma_5}{\sigma_4}} \\
 &= \frac{0.564 - 0.567}{\log \frac{5.659}{2.829}} \\
 &= 0,074
 \end{aligned}$$

Indeks Kompresi (C_c) berhubungan dengan berapa besarnya penurunan yang akan terjadi. Dari perhitungan didapatkan nilai C_c rata-rata sebesar 0.080, yang menurut tabel nilai C_c untuk macam – macam jenis tanah menunjukkan bahwa tanah termasuk ke dalam jenis tanah lempung.

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

Indeks pemampatan, $C_c = 0,080$

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

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

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

Void ratio sebelum pembebanan, $e_0 = 0,452$

Tegangan efektif *overburden*, $\sigma_0' = (7,75) \times (12,472 - 10) = 19,158 \text{ kNn/m}^2$

Sehingga diperoleh besarnya penurunan:

$$\begin{aligned}
 S_c &= \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma'}{\sigma_0'} \right) \\
 &= \frac{0,080 \times 15,5}{1 + 0,825} \log \left(\frac{19,158 + 30}{19,158} \right) \\
 &= 0,278 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan konsolidasi sebesar 0,278 m juga dapat dihitung dengan analisa waktu 90% konsolidasi, sebagai berikut:

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

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

Koefisien kecepatan konsolidasi, $C_v = 4,75 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$

Faktor waktu untuk konsolidasi 90%, $t_{90} = 0,493$

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{Tv \times H^2 dr}{Cv} \\
 &= \frac{0,493 \times 7,75^2}{4,75 \times 10^{-7}} \\
 &= 6233855,63 \text{ detik} \\
 &= 62338552 / (3600 \times 24 \times 30) \\
 &= 24,05 \text{ bulan} = 2 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

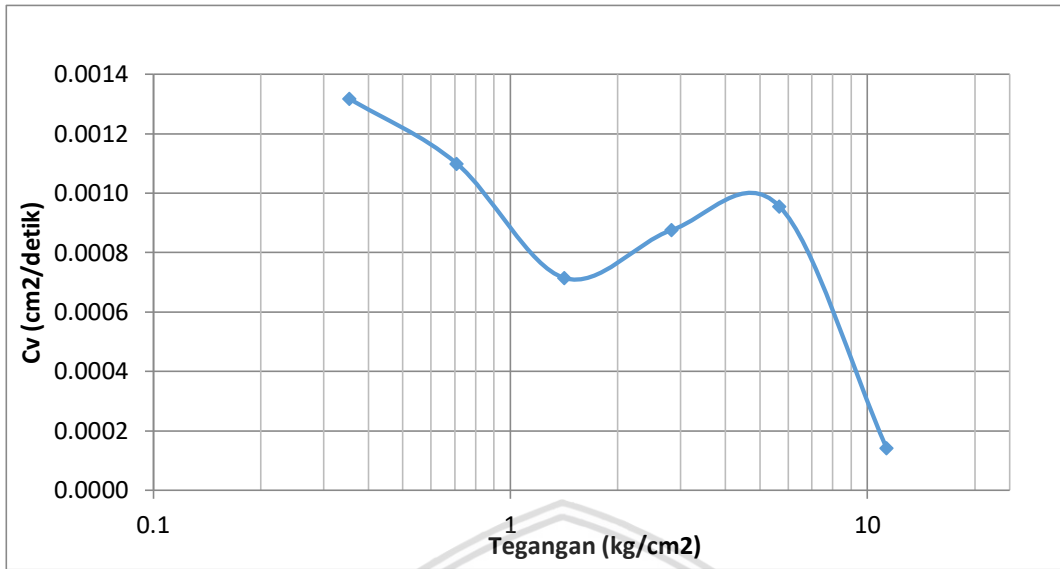
Jadi, konsolidasi yang terjadi sebesar 0,278 m dalam waktu tempuh 2,0 tahun. Apabila dibandingkan dengan konsolidasi tanah asli yang telah dilakukan oleh Arinda dan Zaika (2018) didapat penurunan akibat konsolidasi sebesar 2,65 m dengan waktu tempuh selama 25,7 tahun maka, perbaikan tanah menggunakan semen dapat mengurangi penurunan menjadi lebih kecil serta mempersingkat waktu konsolidasi tersebut.

4.2.3.3 Konsolidasi campuran tanah dan *fly ash*

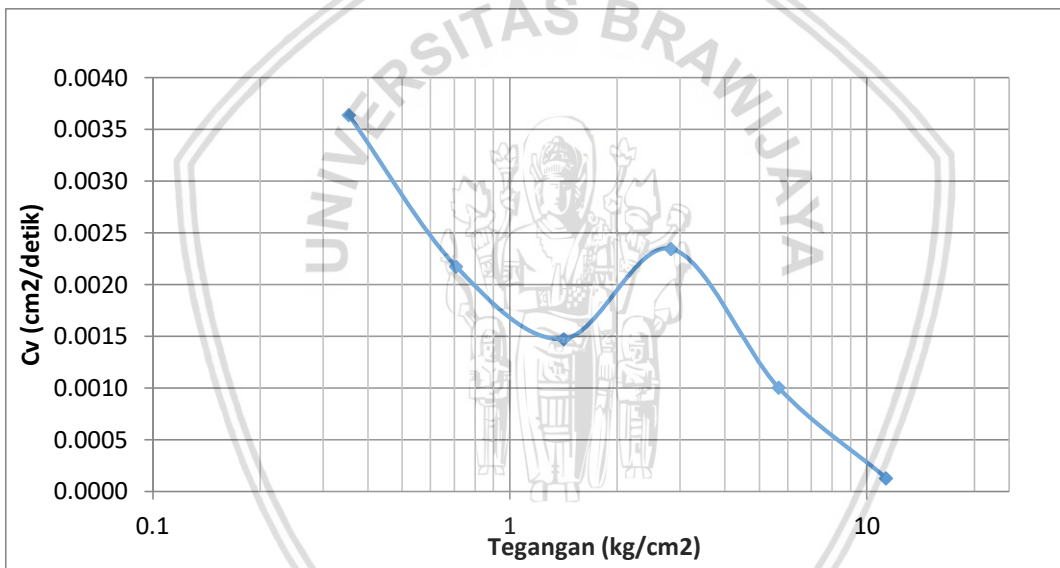
Benda uji yang digunakan untuk uji konsolidasi dengan *fly ash* sesuai dengan ketentuan standar konsol yaitu berukuran diameter 6 cm dan tinggi 1 cm. Untuk kadar yang digunakan sesuai dengan hasil uji kuat tekan bebas yang menghasilkan nilai C_u yang besar kadar kenaikannya untuk kadar *fly ash* yaitu dengan kadar 15% dengan nilai C_u 0,851 dengan kenaikan sebesar 32%. Hasil pengujian konsolidasi dengan campuran tanah dengan *fly ash* dengan kadar 15% dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 4.13 Hasil C_v dengan Akar Waktu t_{90} dan Log Waktu t_{50} konsol *fly ash*

Tegangan (kg/cm^2)	C_v (t_{90})	C_v (t_{50})
0,354	0.00364	0.00132
0,707	0.00217	0.00110
1,415	0.00147	0.00071
2,829	0.00234	0.00088
5,659	0.00100	0.00096
11,318	0.00013	0.00014



Gambar 4.25 Hubungan antara tegangan dan Cv (t50) konsol fly ash

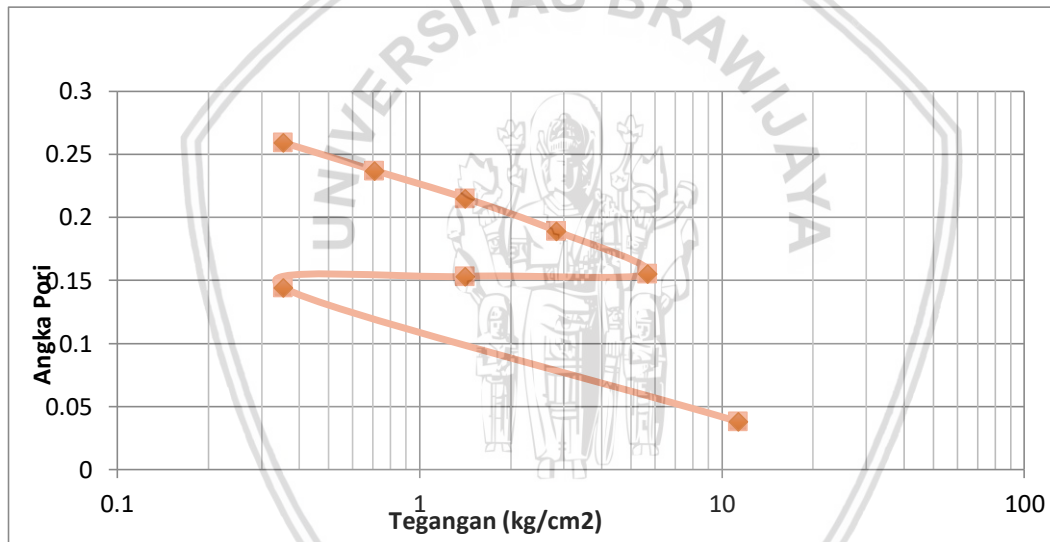


Gambar 4.26 Hubungan antara tegangan dan Cv (t90) konsol fly ash

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 4.14.

Tabel 4.14 Besarnya Konsolidasi dan Angka Pori

Tegangan (kg/cm ²)	Konsolidasi ΔH (cm)	Angka Pori $e = e_0 - \Delta e$
0,000	0.000	0.260
0,354	0.055	0.259
0,707	0.063	0.237
1,415	0.130	0.215
2,829	0.222	0.189
5,659	0.395	0.155
1,415	0.294	0.153
0,354	0.119	0.144
11,318	0.406	0.038



Gambar 4.27 Hubungan antara tegangan dan angka pori

Dari tabel 4.14, dapat dihitung besarnya nilai C_c dengan cara :

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_3 - e_4}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{0.237 - 0.215}{\log \frac{2.829}{1.415}} \\
 &= 1,001 / 0.073
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma_4}{\sigma_3}} \\
 &= \frac{e_4 - e_5}{\log \frac{\sigma_5}{\sigma_4}} \\
 &= \frac{0.215 - 0.189}{\log \frac{5.659}{2.829}} \\
 &= 0,533 / 0.086
 \end{aligned}$$

Indeks Kompresi (C_c) berhubungan dengan berapa besarnya penurunan yang akan terjadi. Dari perhitungan didapatkan nilai C_c rata – rata sebesar 0,0767, 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, $C_c = 0,0767$

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

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

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

Void ratio sebelum pembebanan, $e_0 = 0,739$

Tegangan efektif *overburden*, $\sigma_0' = (7,75) \times (12,472 - 10) = 19,158 \text{ kN/m}^2$

Sehingga diperoleh besarnya penurunan:

$$\begin{aligned}
 S_c &= \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma'}{\sigma_0'} \right) \\
 &= \frac{0,0767 \times 15,5}{1 + 0,739} \log \left(\frac{19,158 + 30}{19,158} \right) \\
 &= 2,413 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Selain itu, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan konsolidasi sebesar 2,413 m juga dapat dihitung dengan analisa waktu 90% konsolidasi, sebagai berikut:

Tebal lapisan tanah terkonsolidasi = 15,5 m

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

Koefisien kecepatan konsolidasi, $C_v = 0,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{det}$

Faktor waktu untuk konsolidasi 90%, $t_{90} = 0,639$

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{Tv \times H^2 dr}{Cv} \\
 &= \frac{0,639 \times 7,75^2}{0,13 \times 10^{-7}} \\
 &= 295230288,5 \text{ detik} \\
 &= 295230288 / (3600 \times 24 \times 30) \\
 &= 113,9 \text{ bulan} = 9,49 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

Jadi, konsolidasi yang terjadi sebesar 2,413 m dalam waktu tempuh 9,49 tahun. Apabila dibandingkan dengan konsolidasi tanah asli yang telah dilakukan oleh Putri an Zaika (2018) didapat penurunan akibat konsolidasi sebesar 2,65 m dengan waktu tempuh selama 25,7 tahun maka, perbaikan tanah menggunakan *fly ash* dapat mengurangi penurunan menjadi lebih kecil serta mempersingkat waktu konsolidasi tersebut.

Hasil dari percobaan Uji Konsolidasi diatas dirangkum dalam Tabel 4.15 berikut:

Tabel 4.15 Rangkuman nilai koefisien dan penurunan hasil uji konsolidasi

Jenis Sampel	Cc	Cv	Penurunan	
			Sc (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

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan hasil penelitian, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

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.

5.2 Saran

Setelah melakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil penelitian ini, maka muncul saran-saran untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut. Saran-saran yang dapat diberikan adalah:

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. *Pengaruh Kadar Air Terhadap Daya Dukung Pada Tanah Lunak di Jalan Tol Gempol – Pasuruan*. Jurnal Geoteknik. 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