



TESIS - RC185401

PENERAPAN *SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL MENGGUNAKAN MATERIAL LUMPUR SIDOARJO YANG DISTABILISASI DENGAN KAPUR

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

03111 8500 10002

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M. Eng

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya

Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, Dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2020



TESIS - RC185401

PENERAPAN *SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL MENGGUNAKAN MATERIAL LUMPUR SIDOARJO YANG DISTABILISASI DENGAN KAPUR

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

03111 8500 10002

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M. Eng

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya

Departemen Teknik Sipil

Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, Dan Kebumihan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

2020



THESIS - RC185401

**APPLICATION OF SOIL-WATER CHARACTERISTIC
CURVE (SWCC) IN EMBANKMENT MODELING
USING SIDOARJO MUDFLOW MATERIALS
STABILIZED WITH LIME**

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

03111 8500 10002

Advisor

Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M. Eng

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya

Civil Engineering Department

Faculty of Civil, Planning, and Geo Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

NRP: 03111850010002

Tanggal Ujian: 26 Juni 2020

Periode Wisuda: September 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M.Eng.

NIP : 19560119 198601 2 001


.....

2. Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.

NIP : 19501011 198203 1 002


.....

3. Dr. Trihanyndio Rendy Satrya.

NIP : 19841010 200812 1 004


.....

Penguji:

1. Prof. Ir. Noor Endah, M.Sc.

NIP : 19510708 197603 2 001


.....

2. Dr. Yudhi Lastiasih, S.T. M.T.

NIP : 19770122 200501 2 002


.....

Kepala Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan



Dr. Ir. Umbara Lasminto, ST., MSc.

NIP 1972102 199802 1 001

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: “**PENERAPAN *SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL MENGGUNAKAN MATERIAL LUMPUR SIDOARJO YANG DISTABILISASI DENGAN KAPUR**” ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tuliskan untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tuliskan yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tuliskan orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, 17 Agustus 2020

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

NRP: 03111850010002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

JUDUL ARTIKEL PUBLIKASI: “PENERAPAN *SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL MENGGUNAKAN MATERIAL LUMPUR SIDOARJO YANG DISTABILISASI DENGAN KAPUR”

PENULIS UTAMA: DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

PENULIS ANGGOTA:

1. Ria Asih Aryani Soemitro
2. Indarto
3. Trihanyndio Rendy Satrya

Artikel Publikasi tersebut merupakan sebagian atau keseluruhan isi **Tesis** pada jurnal atau forum ilmiah yang merupakan karya ilmiah saya sendiri dan terdapat karya ilmiah orang lain. Apabila saya melakukan pelanggaran dari ketentuan publikasi ini, maka saya bersedia mendapatkan sanksi akademik yang berlaku.

Surabaya, 17 Agustus 2020

DYAH AYU RAHMAWATI CUPASINDY

NRP: 03111850010002

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PENERAPAN *SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL MENGGUNAKAN MATERIAL LUMPUR SIDOARJO YANG DISTABILISASI DENGAN KAPUR

Nama Mahasiswa : Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy
NRP : 03111850010002
Jurusan : S2 Geoteknik
Dosen Konsultasi : Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M. Eng.
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.
Dr. Trihanyndio Rendy Satrya.

ABSTRAK

Bencana semburan Lumpur Sidoarjo atau biasa disebut juga LuSi, merupakan salah satu bencana di Indonesia, dengan tingkat kerugian yang besar. Peningkatan kapasitas lumpur yang menumpuk, membuat potensi lumpur sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar urugan yang mempunyai nilai ekonomis yang tinggi.

Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR telah melakukan penelitian pemanfaatan LuSi, sebagai bahan campuran *quarry* untuk material tanggul uji coba (Demplot). Demplot mengalami perubahan karakteristik tanah dan kekuatan tanah menurun, sehingga peluang terjadinya penurunan kuat geser (*shear strength*) tanah, khususnya tanah dasar menjadi meningkat. Perubahan tanah tersebut kemungkinan besar terjadi, karena perubahan iklim yang mempengaruhi kadar air pada tanah. Hal ini dapat ditanggulangi dengan melakukan stabilisasi secara kimia. Material kimia yang digunakan kapur sebagai bahan untuk memperbaiki karakteristik tanah dan kekuatan tanah tanggul serta dilakukan penerapan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) untuk melihat pengaruh perubahan kadar air.

Penelitian ini bersifat pemodelan program bantu geoteknik dengan pengolahan data sekunder dengan didukung data penelitian terdahulu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis stabilitas tanggul akibat penerapan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC), pada tanggul berbahan material LuSi menggunakan stabilisasi tanah yaitu kapur dengan program *GeoStudio*, serta untuk mengetahui penurunan tanggul dengan program *PLAXIS 2D*. Data sekunder yang digunakan pada analisis yaitu data prosentase bahan LuSi yang distabilisasi yang memberikan nilai optimum adalah data LuSi yang distabilisasi dengan 4% kapur CaO dan LuSi distabilisasi dengan 10% kapur Ca(OH)₂, kemudian data *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) berdasarkan pendekatan data parameter fisik dan mekanik.

Material LuSi yang distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂ dapat dimanfaatkan sebagai bahan timbunan tanggul, setelah dilakukan penerapan *matric suction* (melewati proses perubahan iklim). Hasil analisa pemodelan tanggul dengan penerapan *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) ini

menyebabkan kestabilan tanggul mengalami peningkatan nilai faktor keamanan dibandingkan tanpa *matric suction*. *Matric suction* memberikan nilai besar yang membuat tegangan tanah menjadi lebih besar. Pengaruh *matric suction* juga dipengaruhi oleh elevasi muka air tanah dan tinggi endapan LuSi. Berbagai variasi ketinggian dan kemiringan yang dihasilkan dari elevasi muka air tanah, nilai faktor keamanan tanggul mengalami peningkatan yang membuat tanggul masih dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan rentang faktor keamanan 1,3–2,6 pada kondisi geometri tanggul dengan kemiringan (1:1, 1:1.5 dan 1:2) dari variasi tinggi tanggul 6-10 m.

Hasil pengaruh dari tinggi endapan LuSi mengalami penurunan akibat tinggi endapan LuSi, serta adanya variasi geometri tanggul (tinggi dan kemiringan tanggul) yang membuat keamanan tanggul terdapat 3 kondisi. Kondisi pertama, pengaruh tinggi endapan LuSi dengan kemiringan tanggul 1:1 dengan tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai factor keamanan tanggul 1,29–1,65. Kondisi kedua, dengan kemiringan tanggul 1:2 dengan tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai factor keamanan tanggul 1,3–1,8. Kondisi Ketiga, pengaruh tinggi endapan LuSi dapat dikatakan dengan kemiringan 1:2, tinggi timbunan mulai dari 6-10m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai faktor keamanan tanggul dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan rentang factor keamanan 1,27–2,12. Besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur, dengan nilai penurunan berkisar 14 - 40 cm setiap 200 hari. Penurunan pada tanggul tersebut berpengaruh pada geometri pemodelan pada variasi tinggi dan kemiringan tanggul.

Kata kunci: Lumpur Sidoarjo, *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC), *Matric Suction*, Stabilisasi, Faktor Keamanan, Tanggul.

APPLICATION OF SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE (SWCC) IN EMBANKMENT MODELING USING SIDOARJO MUDFLOW MATERIALS STABILIZED WITH CALCIUM HYDROXIDE

Student Name : Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy
NRP : 03111850010002
Majors : S2 Geotechnic
Supervisor : Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M. Eng.
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.
Dr. Trihanyndio Rendy Satrya.

ABSTRACT

Sidoarjo mudflow disaster or commonly known as LuSi (in Indonesian), was one of disasters happened in Indonesia which was causing huge damages. The increased of mud capacity has made Sidoarjo mudflow (LuSi) potentially could be used as high economic value backfill.

River Research and Development Center, Research and Development Center for Water Resources of Public Works and Housing Ministry has been conducted research on the use of LuSi (Sidoarjo mudflow), as a mixture of quarry for the embankment material testing (Demplot). Demplot experienced soil characteristic changes and soil strength decreases, therefore the chances of decrease in shear strength especially the subgrade was increasing. These soil changes generally occurred due to climate change which affected the water content in soil. However, it could be overcome by performing chemical stabilization. The chemical material used here was calcium hydroxide to improve the soil characteristic and embankment strength, as well as applied matric suction value on the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) to see the effects on water content change.

This research was auxiliary geotechnical modelling program followed by secondary data processing and supported by previous researches. The purposes of this research were to analyse embankment stability due to Soil Water Characteristic Curve (SWCC) application on embankment with LuSi material using soil stabilization namely calcium hydroxide with GeoStudio program; and to obtain embankment reduction using PLAXIS 2D program. The secondary data used in the analysis was LuSi material's percentage data which being stabilized. Thus, the data which provided optimum value was stabilized LuSi material with 4% of calcium oxide, stabilized LuSi material with 10% calcium hydroxide, and Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) based on physical and mechanical parameter data approach.

LuSi material stabilized with calcium hydroxide Ca(OH)_2 could be used as embankment material after the application of matric suction parameter (through climate change process). The results of the embankment modeling analysis by applying matric suction on the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) caused the embankment stability increased on safety factor value compared without the matric

suction. Matric suction provided a large value which made the soil stress greater. The influence of matric suction was also influenced by the elevation of ground water level and LuSi sediment height. Several variations of height and slope resulted from ground water level, the safety factor value was increasing and made the embankment in landside condition was rarely to happen (safe) with safety factor range from 1.3-2.6 in embankment geometric condition with a slope (1:1, 1:1.5 and 1:2) from height of embankment variation from 6-10 m.

The result effect of LuSi sediment height has decreased due to LuSi sediment height and geometry variation (embankment height and slope) which made embankment safety has 3 conditions. The first condition was LuSi sediment height effect with embankment slope in ratio 1:1, backfill height start from 6 to 10 m, and LuSi height sediment varied from 1-9 m obtained embankment safety factor value range from 1.29 to 1.65. The second condition with embankment slope in ratio 1:2, backfill height start from 6-10 m, and LuSi sediment height varied from 1-9 m obtained embankment safety factor value range from 1.3 to 1.8. Afterwards, the third condition, LuSi sediment height effect with embankment slope in ratio 1:2, backfill height start from 6 to 10 m, and LuSi sediment height varied from 1 to 9 m obtained safety factor value in landside condition was rarely to happen (safe) with safety factor range from 1.27-2.12. The amount of immediate settlement of embankment made from stabilized LuSi material, with a reduction value range from 14-40 cm every 200 days. The embankment settlement was affected on geometry modeling in height and slope embankment.

Keywords: Sidoarjo Mudflow, Soil-Water Characteristic Curve (SWCC), Matric Suction, Stabilization, Safety Factor, Embankment.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS	i
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI TESIS.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
KATA PENGANTAR.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Penelitian.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Mekanisme Semburan Lumpur.....	7
2.2 Kandungan Lumpur	8
2.3 Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo	9
2.4 Perbaikan Tanah dengan Stabilisasi.....	11
2.4.1 Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur	11
2.5 Perubahan Perilaku Tanah Setelah Distabilisasi.....	14
2.6 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) dan Suction.....	15
2.7 Metode Besarnya Suction dalam Skala pF	17
2.8 Stabilitas Lereng	18
2.9 Retakan pada Tanah.....	20
2.10 Persyaratan Timbunan Biasa.....	21

2.11	Program <i>Geostudio</i> 2012 (<i>SLOPE/W</i>).....	21
2.12	Program <i>PLAXIS 2D</i>	22
2.13	Peneliti Terdahulu	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		39
3.1	Langkah-Langkah Penelitian.....	39
BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum	49
4.2	Penentuan Data <i>Matric Suction</i> berdasarkan <i>Soil-Water Characteristic Curve</i> (<i>SWCC</i>)	51
4.3	Validasi Parameter <i>Matric Suction</i> Hasil Pemodelan <i>SEEP/W</i> terhadap Model <i>SWCC</i>	58
4.4	Stabilitas Tanggul LuSi dengan Memperhatikan Parameter <i>Matric Suction</i>	60
4.4.1	Pengaruh Tinggi Elevasi Muka Air Tanah terhadap Stabilitas Tanggul.....	64
4.4.2	Pengaruh Tinggi Endapan LuSi terhadap Stabilitas Tanggul.....	72
4.4.3	Perbandingan Faktor Keamanan dengan <i>Geostudio</i> dan <i>PLAXIS 2D</i>	79
4.5	Perhitungan Penurunan Segera (<i>Immediate Settlement</i>) pada Tanggul... 81	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA		87
Lampiran 1.....		89
Lampiran 2.....		99
Lampiran 3.....		105
Lampiran 4.....		113
Lampiran 5.....		119
BIODATA PENULIS		121

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Sifat-sifat Lumpur Sidoarjo.....	4
Tabel 2.1 Kandungan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Ukuran Butiran.....	8
Tabel 2.2 Hasil Analisa kimia lumpur Sidoarjo dengan metode SEM-EDX di lokasi Siring	8
Tabel 2.3 Hasil Pengujian Toksikologis Lumpur Sidoarjo	9
Tabel 2.4 Hubungan Faktor Keamanan dan Kejadian Longsor	19
Tabel 2.5 Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng.....	20
Tabel 3.1 Korelasi NSPT.....	41
Tabel 3.2 Konsistensi Tanah Untuk Tanah Dominan Lanau dan Lempung	41
Tabel 3.3 Pedoman Memprakirakan Harga ϕ Dari Harga N-SPT.....	42
Tabel 3.4 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah	43
Tabel 3.5 Poisson's Ratio	44
Tabel 3.6 Nilai koefisien Permeabilitas tanah.....	45
Tabel 4.1 Perbandingan Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum.....	49
Tabel 4.2 Data Pemetaan Parameter Fisik dan Klasifikasi Tanah terhadap <i>Soil-Water Characteristic Curve</i> (SWCC).....	52
Tabel 4.3 Nilai SWCC Yudong Silt	54
Tabel 4.4 Nilai <i>Matric Suction</i> pada SWCC dengan Tanah MH	56
Tabel 4.5 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada <i>SEEP/W</i>	60
Tabel 4.6 Parameter Tanah Dasar DB-01 (lanjutan).....	61
Tabel 4.7 Estimate Volumetric Water Content	61
Tabel 4.8 Estimate Hydraulic Conductivity Function.....	62
Tabel 4.9 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada <i>SLOPE/W</i>	63
Tabel 4.10 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada <i>SLOPE/W</i> (lanjutan).....	63
Tabel 4.11 Parameter Timbunan pada <i>SLOPE/W</i>	63
Tabel 4.12 Rekapitulasi Hasil Pemodelan Tanggul Elevasi Muka Air Tanah	70
Tabel 4.13 Rekapitulasi Hasil Pemodelan Tanggul Endapan LuSi.....	78

Tabel 4.14 Rekapitulasi Hasil Faktor Keamanan Tanggul pada <i>PLAXIS 2D</i> dengan <i>SLOPE/W</i>	80
Tabel 4.15 Parameter Tanah Dasar dan Timbunan <i>PLAXIS 2D</i>	81
Tabel 4.16 Parameter Tanah Dasar dan Timbunan <i>PLAXIS 2D</i> (lanjutan)	82
Tabel 4.17 Rekapitulasi Hasil Penurunan Tanggul pada <i>PLAXIS 2D</i>	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tanggul uji coba	2
Gambar 1.2 (a) Kondisi keretakan pada tanggul uji coba ; (b) Kondisi erosi pada sisi tanggul	2
Gambar 2.1 Pembentukan <i>gel</i> CaSiO_3 yang mengikat butiran lempung (Ingels dan Metcalf, 1992).....	13
Gambar 2.2 Penentuan perkiraan prosentase kapur yang dibutuhkan (PU, 2007)	14
Gambar 2.3 Hubungan antara persentase penambahan kapur dengan nilai CBR (Wiqoyah, 2006)	15
Gambar 2.4 Hubungan antara persentase penambahan kapur dengan nilai swelling potensial (Wiqoyah, 2006)	15
Gambar 2.5 Bentuk umum <i>Soil-Water Characteristic Curves</i> (SWCC) (Fredlund, 2000)	16
Gambar 2.6 Ilustrasi putaran histeresis dalam SWCC pada tanah. (Sumber: Fredlund, 2000).....	17
Gambar 2.7 Kurva hasil pemadatan LuSi yang distabilisasi dengan kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada prosentase yang berbeda: a) berat volume kering maksimum; b) kadar air optimum (Iis Faizah, 2013).....	25
Gambar 2.8 Pengaruh prosentase kapur $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Iis Faizah, 2013).....	27
Gambar 2.9 Pengaruh umur stabilisasi terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Iis Faizah, 2013).....	28
Gambar 2.10 Pengaruh prosentase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terhadap <i>Specific Gravity</i> (Iis Faizah, 2013).....	29
Gambar 2.11 Pengaruh umur stabilisasi terhadap <i>Specific Gravity</i> (Iis Faizah, 2013)	30
Gambar 2.12 Pengaruh prosentase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) kohesi (Iis Faizah, 2013).....	31
Gambar 2.13 Pengaruh umur stabilisasi terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) kohesi (Iis Faizah, 2013).....	32

Gambar 2.14 Kurva hasil pemadatan LuSi yang distabilisasi dengan kapur CaO pada prosentase yang berbeda: a) berat volume kering maksimum; b) kadar air optimum (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018).....	34
Gambar 2.15 Pengaruh prosentase kapur CaO terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)	36
Gambar 2.16 Pengaruh prosentase CaO terhadap <i>Specifiv Gravity</i> (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018).....	37
Gambar 2.17 Pengaruh prosentase CaO terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) kohesi (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018).....	38
Gambar 3.1 Pedoman Memprakirakan Harga ϕ Dari Harga IP	43
Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian	46
Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian (Lanjutan)	47
Gambar 4.1 Analisis ayakan <i>Yodung Silt</i> (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang, ¹ Chong Liu, ² and Zhiquan Huang ¹ , 2018).....	52
Gambar 4.2 Nilai SWCC <i>Yudong Silt</i> (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang, ¹ Chong Liu, ² and Zhiquan Huang ¹ , 2018).....	55
Gambar 4.3 <i>Soil-Water Characteristic Curve</i> (SWCC) tanah MH (Herlinawati, 2018).....	57
Gambar 4.4 SWCC untuk validasi posisi nilai <i>matric suction</i> (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang, ¹ Chong Liu, ² and Zhiquan Huang ¹ , 2018).....	58
Gambar 4.5 Validasi hasil perhitungan SEEP/W sesuai dengan SWCC.....	59
Gambar 4.6 Geometri tanggul dengan variasi elevasi muka air tanah dengan tanah timbunan berplastisitas rendah.....	65
Gambar 4.7 Kurva hasil pemodelan tanggul elevasi muka air tanah dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1,5; c) Kemiringan 1:2.....	67
Gambar 4.8 Hasil stabilitas tanggul pada pemodelan dengan pengaruh elevasi muka air tanah terhadap tanggul.....	69

Gambar 4.9 Geometri tanggul dengan variasi tinggi endapan LuSi dengan tanah timbunan berplastisitas rendah.....	73
Gambar 4.10 Kurva hasil pemodelan tanggul endapan LuSi dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1,5; c) Kemiringan 1:2	75
Gambar 4.11 Hasil stabilitas tanggul pada pemodelan dengan pengaruh tinggi endapan LuSi terhadap tanggul.....	77
Gambar 4.12 Kurva hasil faktor keamanan tanggul pada : a) <i>PLAXIS 2D</i> ; b) <i>SLOPE/W</i>	80
Gambar 4.13 Kurva hasil penurunan tanggul dengan <i>PLAXIS 2D</i>	83

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan rahmat dan kesempatan yang telah dilimpahkan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “Penerapan Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) pada Pemodelan Tanggul Menggunakan Material Lumpur Sidoarjo yang Distabilisasi dengan Kapur”. Dalam kesempatan ini penulis bermaksud mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung dan membantu atas terselesaikannya Tesis ini, yaitu:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat serta anugerah-Nya.
2. Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng dan Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA dan Dr. Trihanyndio Rendy Satrya selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan serta bimbingannya dalam proses penyusunan Tesis ini.
3. Dosen-Dosen bidang Geoteknik yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan mengenai geoteknik sehingga menunjang penyusunan Tesis ini.
4. Kedua orang tua, kakak dan adik yang telah memberi doa dan restunya sehingga penulis bisa menyelesaikan Tesis ini dengan baik.
5. Teman – teman Pascasarjana terutama Bidang Keahlian Geoteknik yang telah memberi motivasi dan bantuan dalam penyelesaian Tesis ini.
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas bantuan dan kerjasama yang tulus.

Penulis berharap Tesis ini dapat berguna bagi semua pihak dalam pengaplikasian ilmu dan teknologi dalam masyarakat. Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih terdapat kekurangan, untuk itu segala saran dan masukan tentang penulisan Tesis ini sangat diharapkan.

Surabaya, 17 Agustus 2020

(Penulis)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada tanggal 29 Mei 2006 telah terjadi semburan lumpur yang sangat besar di lokasi pengeboran tepatnya berjarak 100 – 200 meter dari Sumur Banjar Panji-1 (BPJ) milik PT. Lapindo Brantas di Desa Remokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur yang sekarang dikenal dengan sebutan LuSi. Sampai saat ini LuSi tersebut masih terus aktif menyemburkan lumpur panas dengan volume yang sangat besar, yaitu berkisar 100.000 sampai 120.000 m³/hari yang mengakibatkan 16 desa di tiga kecamatan terendam lumpur dengan ketinggian 6 (enam) meter dan lebih dari 25.000 jiwa harus diungsikan. Untuk mengatasi semburan lumpur yang terus keluar, maka dibuatlah tanggul cincin yang mengelilingi pusat semburan dengan panjang ± 13.00 km untuk menampung luapan lumpur agar tidak meluas ke daerah disekitarnya. Untuk mempertahankan volume lumpur yang tertampung, maka sebagian lumpur dialirkan menuju Kali Porong menggunakan sistem pompa, untuk selanjutnya lumpur dibuang ke laut secara alami mengikuti (terbawa) aliran sungai (Sumber : Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR).

Dari beberapa penelitian, potensi lumpur sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar atau bahan tambah yang bisa menambah nilai ekonomis suatu produk, seperti: batu bata, batako, *cone block*, *paving block*, genting, beton ringan, dan lain sebagainya. Pada tahun 2018, Balai Litbang lumpur sidoarjo sebagai bahan campuran dengan *borrow area* untuk material timbunan tanggul. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan formula campuran yang optimal sebagai bahan timbunan yaitu 70% Lumpur Sidoarjo dengan 30% tanah *quarry*. Campuran 70% Lumpur Sidoarjo dengan 30% tanah *quarry* mendapatkan nilai kohesi sebesar 0.53 kg/cm² dan sudut geser 23.13°. Dari hasil tersebut diterapkan dengan pembuatan tanggul uji coba (demplot) di Porong, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur. (Gambar 1.1)



Gambar 1.1 Tanggul uji coba

(Dokumentasi : Dyah Ayu Rahmawati C,2018)

Dari penerapan penelitian tersebut, di tahun pertengahan 2019 bulan Juli dilakukan monitoring dan evaluasi kinerja dari tanggul uji coba didapatkan beberapa fakta yaitu, terdapat retakan (*crack*) pada kedua sisi tanggul dengan kedalaman ± 50 cm dan panjang retakan ± 1.3 m. Kemudian kondisi tanggul uji coba (demplot) terdapat juga bagian erosi pada sisi tanggul dengan panjang ± 2.7 m (Gambar 1.2). Hasil monitoring dan evaluasi tersebut itulah dijadikan sebagai penelitian stabilitas lereng dengan menerapkan pengaruh kadar air yang berubah-ubah (perubahan iklim) dengan material LuSi sebagai bahan urugan untuk tanggul.



(a)



(b)

Gambar 1.2 (a) Kondisi keretakan pada tanggul uji coba ; (b) Kondisi erosi pada sisi tanggul
(Dokumentasi : Dyah Ayu Rahmawati C, 2018)

Kejadian keretakan dan erosi tanggul uji coba dicurigai adanya faktor perubahan iklim. Indonesia merupakan negara yang memiliki iklim tropis dan memiliki dua musim, yaitu musim

hujan dan musim kemarau. Saat musim hujan volume air di dalam tanah meningkat, sedangkan pada musim kemarau volume air di dalam tanah berkurang. Maka, iklim tersebut direpresentasikan pada siklus pembasahan dan pengeringan yang terjadi pada kondisi tanah akibat iklim. Siklus pembasahan dan pengeringan merupakan peristiwa alam yang terjadi secara terus-menerus pada daerah beriklim tropis seperti Indonesia. Pada proses pembasahan dan pengeringan secara berulang dapat memengaruhi sifat fisik dan mekanik dari tanah itu sendiri karena terjadinya perubahan volume tanah yang disebabkan oleh perubahan kadar air.

Rahardjo (2009) mengatakan curah hujan dan penguapan menyebabkan perubahan dalam tekanan air pori yang berpengaruh terhadap kekuatan geser tanah. Pada umumnya tanah berada pada kondisi setengah jenuh (*partially saturation*), pada kondisi ini tegangan air pori dapat bernilai negatif yang menimbulkan terjadinya gaya serap (*soil suction* atau *matrix suction*) dan berpengaruh terhadap kuat geser tanah (*shear strength*). Kondisi *partially saturation*, ruang pori sebagian terisi air yang merupakan matrik suction ($u_a - u_w$) dan dapat membentuk maniskus air, yang timbul karena fenomena tegangan permukaan (*surface tension*). Factor musim hujan diperkirakan sebagai penyebab utama terjadinya kelongsoran (Brand, 1994 dalam Lim et al, 1996). Meningkatnya kandungan air dalam tanah dapat disebabkan oleh hujan selama periode tertentu, sehingga tegangan efektif menurun dan berakibat tegangan geser dalam tanah menurun pula (Suryolelono, 2001).

Perubahan kadar air yang dipengaruhi oleh faktor iklim dapat dilihat dari data Soil-Water Characteristic Curve (SWCC). *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) merupakan hubungan antara potensial air tanah dan *gravimetric water content*, *volumetric water content* or *degree of saturation*. SWCC merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk pemodelan aliran air tanah (Xiaoli Fu et al, 2011). *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) merupakan kurva yang menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan *suction* tanah, (L'Heureux, 2005). Jumlah air tersebut diartikan sebagai *Volumetric water content* (VWC), kadar air gravimetric (w_c), atau derajat kejenuhan (S_r). SWCC juga sering diartikan sebagai *retention curve* atau *volumetric water content curve* yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air. SWCC memberikan gambaran tentang distribusi ukuran butir tanah dan informasi penting mengenai hidrolis sama seperti karakteristik mekanik dan perilaku tanah jenuh Sebagian (Leroueil dan Hight, 2003). Banyak sifat tanah yang bisa diperoleh dari SWCC, seperti kuat geser tanah, koefisien permeabilitas dan derajat kejenuhan (Siller et al, 2001).

Berdasarkan kurva SWCC yang berhubungan dengan nilai permeabilitas tanah terdapat *properties unsaturated soil* yaitu *Hydraulic conductivity*. *Hydraulic conductivity* yang

merupakan kemampuan tanah untuk melewatkan air, baik pada kondisi jenuh ataupun jenuh sebagian. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian secara signifikan dipengaruhi oleh perubahan angka pori dan derajat kejenuhan. Besarnya *hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian tidaklah konstan, hal ini tergantung pada nilai VWC, dengan demikian dapat dikatakan bahwa *hydraulic conductivity* tanah jenuh sebagian tergantung pada nilai suction tanah. *Hydraulic conductivity* pada tanah jenuh sebagian dapat ditentukan dengan memplotkan fungsi dari *matric suction* pada SWCC yang merupakan kurva hubungan antara derajat kejenuhan atau *volumetric water content* dan *matric suction*, dengan menggunakan koefisien permeabilitas pada tanah jenuh (k_{sat}).

Penanggulangan keretakan dan erosi tanggul uji coba dapat dilakukan dengan melakukan perkuatan atau stabilisasi terhadap tanggul tanah dengan melihat data kandungan sifat dari LuSi (Tabel 1.1), terlihat bahwa nilai Indeks Plastisitas (IP) sangat tinggi. Selain itu, untuk menjadikannya sebagai material urugan tanggul, LuSi tersebut sulit untuk dipadatkan. Oleh sebab itu, diperlukan stabilisasi untuk memperbaiki sifat yang jelek tersebut. Stabilisasi yang akan dilakukan berupa stabilisasi kimia, dengan mencampurkan bahan stabilisasi berupa kapur ke dalam LuSi.

Kapur adalah salah satu bahan yang dipakai untuk stabilisasi tanah. Bahan ini mudah didapat karena banyak dipasarkan dan diproduksi secara besar-besaran. Kapur mengandung kation-anion Ca^{++} Mg^{++} yang mampu menetralkan sifat kembang susut tanah lempung atau lanau yang besar. Tujuan pemakaian kapur adalah untuk menambah kekuatan, kekakuan, dan ketahanan dari tanah berbutir halus dan terkadang digunakan juga untuk menaikkan sifat-sifat fraksi dari tanah-tanah granuler. Selain itu kapur juga adalah untuk merangsang terjadinya proses sementasi antara butiran tanah sehingga membentuk gumpalan partikel yang lebih besar sehingga plastisitas tanah akan berkurang yang pada akhirnya juga berpengaruh terhadap penambahan kekuatan tanah (Isabella, 2019).

Tabel 1.1 Sifat-sifat Lumpur Sidoarjo

Parameter		Satuan	Hasil Uji
Batas Cair	LL	%	72.60
Batas Plastis	PL	%	38.62
Indeks Plastisitas	IP	%	33.98
Berat Jenis	Gs	-	2.560

Parameter		Satuan	Hasil Uji
Kadar Air	W _c	%	40.111

Sumber : Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR

Dalam penelitian (Sudirman, 1988) dikatakan bahwa dengan pemakaian kapur bentuk *powder* mampu menurunkan harga *plasticity index* hingga 64%. Hal ini diperkuat dengan adanya penelitian di daerah Cepu oleh Sudjanarko Sudirham dan Ria Asih Aryani Soemitro (1986). Dikatakan pula penambahan kapur dengan kadar 10% akan mampu mengurangi harga *swelling* yang relatif besar. Penelitian Roosatrijo (1997) juga didapatkan bahan kapur mampu mengurangi terjadinya *swelling* pada tanah lempung atau lanau hingga 7%. Bahkan kapur memungkinkan pengurangan *swelling* tanpa harus melalui proses pemeraman, jadi reaksi kapur akan terjadi langsung pada saat itu juga tanpa harus diperam atau direndam terlebih dahulu.

Dari beberapa uraian di atas maka penting dilakukan penelitian ini untuk mengetahui pemodelan stabilitas tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi dengan kapur serta menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) untuk melihat nilai faktor keamanan pada tanggul dengan berbagai variasi kemiringan, ketinggian, elevasi muka air tanah dan endapan LuSi pada tanggul dan mengetahui penurunan segera (*Immediate Settlement*) tanggul. Apabila pemodelan ini dapat memberikan hasil, maka material LuSi dapat dimanfaatkan secara maksimum. Hasilnya dapat digunakan sebagai bahan tanggul, timbunan jalan, reklamasi dan bahan urugan lain. Serta, penerapan pemodelan tanggul tersebut dapat digunakan sebagai dasar kondisi aman terhadap stabilitas lereng dari longsor yang terjadi pada tanggul yang telah melewati factor perubahan iklim.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas dapat dirumuskan permasalahannya adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur dengan menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)?
2. Bagaimana stabilitas dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur dengan variasi ketinggian dan kemiringan tanggul untuk kondisi elevasi muka air tanah yang berbeda dan tingi endapan LuSi yang berbeda dengan menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)?

3. Berapa besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pemodelan tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur dengan menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
2. Mengetahui stabilitas dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur dengan variasi ketinggian dan kemiringan tanggul untuk kondisi elevasi muka air tanah yang berbeda dan tinggi endapan LuSi yang berbeda dengan menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)..
3. Mengetahui besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah tersedianya bahan tanggul alternative sebagai pengganti dari bahan urugan yang diambil dari quarry. Selain itu, bermanfaat untuk mengurangi volume endapan Lumpur Sidoarjo secara drastis sehingga tidak perlu dilakukan peninggian tanggul penahan dan penambahan luas area penampung. Serta, penerapan pemodelan tanggul tersebut dapat digunakan sebagai dasar kondisi aman terhadap longsor yang terjadi pada tanggul.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini dapat lebih fokus, maka penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Pemilihan prosentase optimum LuSi yang distabilisasi dengan kapur dan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) dengan pengolahan data sekunder yang didukung data penelitian terdahulu.
2. Pemodelan tanggul dengan software geoteknik (*GeoStudio* dan *PLAXIS 2D*) dengan 4 variasi model (ketinggian, kemiringan tanggul, elevasi muka air tanah, dan tinggi endapan LuSi).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mekanisme Semburan Lumpur

Lumpur panas yang memancar keluar dari dalam tanah merupakan salah satu fenomena geologi yang dikenal sebagai Lumpur Vulkanik. Lumpur Vulkanik merupakan gunung berapi kecil berbentuk kerucut yang berisi lumpur dan tanah liat. Lumpur Vulkanik ini terbentuk dari campuran air panas dan sedimen (lumpur dan tanah liat). Lumpur dan tanah liat itu berasal dari batuan magma yang jauh di dalam tanah, yang mengubah air tanah menjadi lumpur dan tanah liat. Proses keluarnya lumpur vulkanik adalah dengan keluar secara perlahan melalui rongga-rongga tanah seperti aliran cairan lava atau terlontar keluar ke udara seperti pancuran cairan lava dengan membawa gas vulkanik dan air mendidih (UNDAC, 2006 dalam Bowoputro, dkk, 2009).

Selain fenomena lumpur vulkanik, ada juga para ahli geologi yang menganalogikan semburan lumpur Sidoarjo dengan gejala alam yang disebut gunung lumpur (*mud volcano*). Adanya fenomena *mud volcano* yang menyebabkan terjadinya gunung lumpur memang masuk akal. Karena di dekat lokasi semburan ditemukan adanya potensi gunung lumpur. Dari temuan sementara, di Sidoarjo terdapat beberapa titik potensi gunung lumpur. Diantaranya di Sedati, Porong dan temuan terakhir di Sukodono. Dari data satelit, wilayah yang diduga potensial gunung lumpur di Sukodono bahkan mencapai satu hektar (BLPS, 2011).

Semburan lumpur Sidoarjo yang berlangsung sampai saat ini diakibatkan aktifnya gunung lumpur yang telah terbentuk sekitar 150.000 – 200.000 tahun lalu. Sejumlah ilmuwan termuka Rusia yang meneliti semburan lumpur Sidoarjo menyatakan bahwa bencana tersebut bukan disebabkan aktivitas pengeboran sumur minyak di area tersebut. Tim ilmuwan Rusia menyimpulkan, semburan tersebut merupakan hasil dari pengaktifan kembali gunung lumpur tua yang terjadi akibat dari serangkaian kegiatan seismik yang telah dimulai 10 bulan sebelum terjadinya letusan lumpur di Sidoarjo (Kedurin, 2010).

Aktifnya kembali gunung lumpur ini ternyata sudah dipicu oleh dua gempa bumi yang terjadi pada 9 Juli 2005 dengan pusat gempa tepat di bawah zona letusan lumpur dengan kekuatan gempa 4,4 skala richter (SR). Kemudian, diikuti gempa berkekuatan 5,5 SR yang berjarak sekitar 450 kilometer dari lokasi lumpur. Letusan lumpur di area gunung lumpur

merupakan salah satu peristiwa geologi yang membantu pembukaan saluran lumpur (Kedurin, 2010).

2.2 Kandungan Lumpur

Semenjak terjadinya semburan lumpur Sidoarjo, banyak pihak-pihak yang meneliti tentang kandungan dari lumpur tersebut. Penelitian tersebut diantaranya mencakup komposisi lumpur berdasarkan ukuran butirannya (Tabel 2.1), kandungan kimianya dan bentuk strukturnya (Gambar 2.1). Berdasarkan hasil pengujian Depudi Bidang TPSA-BPPT dalam Setyowati (2009), hasil analisa lumpur Sidoarjo memiliki kandungan mineral dan kimia yang tidak jauh beda dengan kandungan mineral tanah lempung terutama dengan kandungan silika yang sangat tinggi (Tabel 2.2.).

Kandungan kimia lumpur berdasarkan pengujian toksikologis dari 3 laboratorium terakreditasi (Sucofindo, Corelab dan Bogorlab) diperoleh kesimpulan bahwa lumpur tidak termasuk limbah B3. Hasil pengujian menunjukkan semua parameter bahan kimia itu di bawah baku mutu (Tabel 2.3), sehingga pemanfaatan lumpur sebagai bahan bangunan aman bagi kesehatan (Mukono, 2006 dalam Setyowati, 2009).

Tabel 2.1 Kandungan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Ukuran Butiran

Jenis	Prosentase
Clay (Lempung)	71,43%
Silt (Lanau)	10,71 %
Sand (Pasir)	17,86 %

Sumber : Noerwarsito *dalam* Setyowati, 2009

Tabel 2.2 Hasil Analisa kimia lumpur Sidoarjo dengan metode SEM-EDX di lokasi Siring

Element O	(keV)	Mass % 45.88	Error %	At %	Compound	Mass %	Cation K	
Na K	1.041	1.17	1.10	1.71	Na ₂ O	1.57	0.43	1.8924
Mg K	1.235	1.75	1.00	4.84	MgO	2.90	0.60	2.5165
Al K	1.486	13.27	1.09	16.54	Al ₂ O ₃	25.07	4.12	22.5960
Si K	1.739	25.67	1.18	61.46	SiO ₂	54.92	7.65	44.6292
Ci K	2.621	0.91	0.65	1.72	Cl	0.91	0.00	1.9770
K K	3.312	1.93	0.98	1.66	K ₂ O	2.32	0.41	4.6320

Element O	(keV)	Mass % 45.88	Error %	At %	Compound		Mass %	Cation K
Ca K	3.690	1.54	1.31	2.58	CaO	2.16	0.32	3.9388
Fe K	6.398	7.89	2.54	9.50	FeO	10.15	1.18	17.8180
Total		100.00		100.00		100.00	14.71	

Sumber : Depudi Bidang TPSA-BPPT dalam Setyowati, 2009

Tabel 2.3 Hasil Pengujian Toksikologis Lumpur Sidoarjo

Beberapa Hasil Pengujian		
Parameter	Hasil Uji Maksimum	Baku Mutu (PP Nomor 18/1999)
Arsen	0,045 Mg/L	5 Mg/L
Barium	1,066 Mg/L	100 Mg/L
Boron	5,097 Mg/L	500 Mg/L
Timbal	0,05 Mg/L	5 Mg/L
Raksa	0,004 Mg/L	0,2 Mg/L
Sianida Bebas	0,02 Mg/L	20 Mg/L
Trichlorophenol	0,017 Mg/L	2 Mg/L (2, 4, 6 Trichlorophenol) 400 Mg/L (2, 4, 4 Trichlorophenol)

Sumber : <https://id.wikipedia.org/> dalam Setyowati, 2009

2.3 Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo

Selama ini pemanfaatan Lumpur Sidoarjo yang sudah dilakukan meliputi pemakaian sebagai pengganti semen untuk bahan bangunan dan juga sebagai pengganti tanah liat sebagai bahan pembuatan batu bata. Hasil penelitian Lumpur Sidoarjo sebagai bahan pengganti semen diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Novianti (2008), dengan menggunakan lumpur kering lolos ayakan No. 50 untuk mengurangi PC sebesar 60% dapat menghasilkan paving blok dengan kekuatan kuat tekan rata-rata 22,74 Mpa dan kuat tekan minimumnya 20,41 Mpa. Menurut SNI 03-0691-1996 mutu paving blok tersebut termasuk dalam paving mutu kelas III, dan dapat digunakan untuk jalan setapak, pertamanan, dan lain-lain yang tidak menerima beban berat. Penelitian yang lain menunjukkan bahwa penggunaan Lumpur Sidoarjo untuk

mengurangi pemakaian semen sebesar 24,56% untuk membuat beton pejal mampu menurunkan presentase penyerapan air secara optimum yaitu sebesar 18,21% dan menghasilkan kuat tekan sebesar 71,5 kg/cm², beton pejal ini tergolong dalam mutu B1 (Wiryasa & Sudarsana, 2009).

Pada Tahun 2015, Maliki dkk melakukan studi untuk memanfaatkan LuSi dalam volume yang sangat besar dengan tujuan untuk mengurangi endapan LuSi sehingga tidak perlu meninggikan tanggul secara terus menerus. Penggunaan LuSi dalam volume besar diantaranya adalah untuk material urug; sebagai contoh untuk urugan suatu area yang akan di reklamasi. Dengan demikian, material LuSi harus dapat diangkut dengan mudah tidak seperti kondisi initial LuSi yang sangat lembek dan sangat plastis (*lumpy*). Hal ini dapat dilakukan apabila LuSi dirubah menjadi material berbutir kasar atau granular. Perubahan ukuran butiran lempung menjadi material granular dapat dilakukan melalui proses granulasi dengan menggunakan drum granulator berputar. Distribusi ukuran butiran yang dihasilkan oleh tabung granulator dipengaruhi oleh diameter drum, panjang drum, kecepatan putar drum, kemiringan drum, banyaknya air yang disemprotkan (kadar air), dan temperature dalam drum. Untuk memudahkan pelaksanaan proses granulasi maka dibuat model matematis dan simulasi dari parameter tabung granulator tersebut dengan menggunakan program Matlab. Dengan simulasi tersebut dapat diketahui variasi dari semua parameter tersebut diatas agar diperoleh distribusi ukuran butiran yang bergradasi baik (*well graded*). Penelitian ini dapat menghasilkan butiran tetapi plastisitas dari granular LuSi tetap tinggi seperti kondisi initial.

Dalam rangka menyempurnakan hasil studi yang dilakukan Maliki dkk (2015). Pasmal, Dasyri dan N.E Mochtar (2019) melakukan penelitian LuSi yang dicampur dengan kapur Ca(OH)₂ sebagai bahan stabilisasi sebanyak 10% dan diperam selama 20 hari (Iis Faizah, 2013). Stabilisasi diperlukan mengingat plastisitas LuSi yang tinggi dan material granular LuSi akan kembali menjadi lumpur apabila direndam air (Maliki dkk, 2015). Material granular LuSi yang distabilisasi dinamakan sebagai *granular lime-stabilized* LuSi (SGL); material SGL merupakan material yang nonplastis dan tahan terhadap air. Dalam studinya, Pasmal, Dasyri dan N.E Mochtar (2019) menggunakan 3 (tiga) kecepatan putar yang berbeda yaitu V = 6rpm, 8rpm, dan 10rpm. Untuk tes kepadatan, digunakan enersi yang setara dengan 90% enersi untuk tes pemadatan tertinggi (setara dengan 100% enersi tes Standard Proctor). Material SGL yang sudah dipadatkan dengan 90% enersi yang tertinggi tersebut diperoleh nilai CBR rendaman minimum adalah 7%, 12%, dan 13% masing-masing untuk V = 6rpm, 8rpm, dan 10rpm. Nilai CBR tersebut menunjukkan bahwa SGL dapat digunakan sebagai material urugan pilihan

(*Selected Fill Material*) karena CBR rendaman minimum > 6% dan SGL merupakan material yang nonplastis.

2.4 Perbaikan Tanah dengan Stabilisasi

Stabilisasi tanah adalah usaha untuk merubah atau memperbaiki sifat-sifat tanah agar memenuhi syarat teknis tertentu. Dalam pengertian luas, stabilisasi tanah adalah pencampuran tanah dengan bahan tertentu untuk memperbaiki sifat-sifatnya diantaranya meningkatkan daya dukung, kemudahan dikerjakan dan mengurangi potensi kembang susut apabila terjadi perubahan kadar air (Hardiyatmo, 2010).

Stabilisasi tanah lempung yang sudah umum dilakukan adalah stabilisasi dengan mencampur bahan kimia. Pencampuran dengan bahan kimia dapat memperbaiki sifat tanah lempung seperti penambahan Semen Portland (PC) atau kapur (*lime*). Bahan tambahan ini bekerja sesuai pengikat campuran yang secara permanen mengikat partikel-partikel tanah secara Bersama-sama sehingga terbentuk material tanah dengan butiran lebih besar. Butiran yang membesar ini dapat menambah kekuatan tanah lempung dengan mengurangi plastisitasnya. Tanah lempung yang telah dicampur dengan bahan stabilisasi tersebut harus dihamparkan dan dipadatkan dengan baik.

2.4.1 Stabilisasi Tanah Lempung dengan Kapur

Kapur merupakan bahan yang efektif untuk stabilisasi tanah dengan plastisitas tinggi karena tanah menjadi lebih mudah untuk dikerjakan dan kekuatannya meningkat. Hanya kapur merupakan bahan yang kurang efektif untuk tanah yang tidak berkohesi atau tanah berkohesi rendah. Oleh sebab itu kapur sangat disarankan untuk dipakai sebagai bahan stabilisasi tanah kohesif seperti tanah lempung, tetapi tidak disarankan untuk tanah yang tidak berkohesi.

Menurut SNI-03-3437-1994, proses kimia yang terjadi pada stabilisasi tanah menggunakan kapur adalah sebagai berikut :

a) Absorpsi dengan air, reaksi eksotermis dan reaksi ekspansif.

Bila kapur dicampur pada tanah yang di dalamnya ada kandungan airnya, akan terjadi reaksi sebagai berikut :



Reaksi antara air dengan kapur akan menimbulkan panas dan pada saat bersamaan, volume kapur menjadi lebih besar dari volume asalnya sehingga menyebabkan turunnya kandungan air di dalam tanah.

b) Reaksi pertukaran ion

Penambahan kapur ke dalam tanah akan memberikan ion-ion kalsium yang berlimpah (ion-ion Ca^{2+} dan Mg^{2+}). Pada umumnya ion-ion Ca ini cenderung menggantikan kation-kation seperti hydrogen (H^+), sodium (Na^+) atau potassium (K^+) yang ada pada partikel lempung, dan proses ini disebut pertukaran ion/kation. Penggantian sodium atau potassium dengan kalsium untuk mereduksi indeks plastisitas lempung. Reduksi plastisitas umumnya diikuti pula dengan reduksi kembang susut tanah dan reduksi kemudahan kehilangan kekuatan oleh perubahan air.

c) Reaksi pozzolan

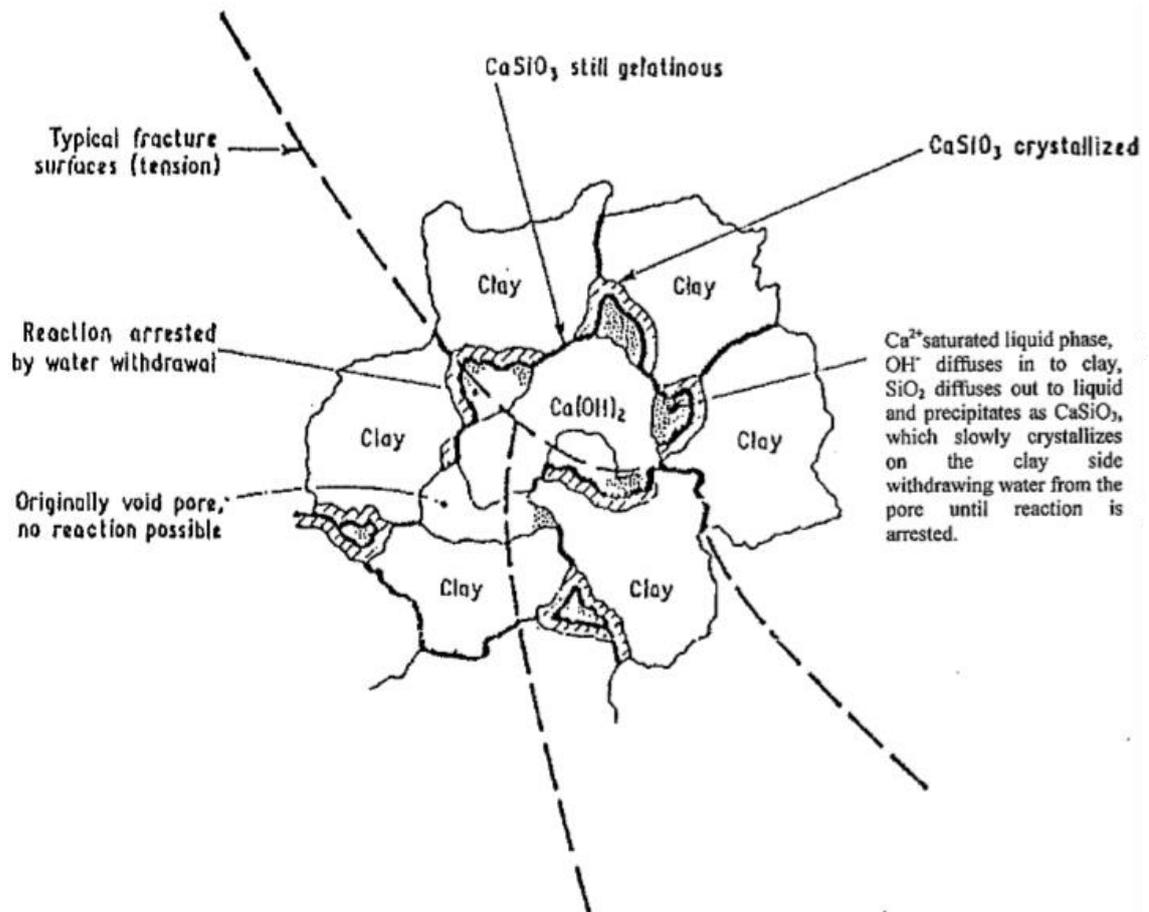
Jika silika (SiO_2) dan Alumina (Al_2O_3) halus yang terkandung dalam tanah lempung bereaksi dengan kapur dan air akan terbentuk kalsium silika hidrat, seperti : kalsium alumina hidrat ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$). $12\text{H}_2\text{O}$) dengan gelenit hidrat ($12\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$). SiO_2 . $6\text{H}_2\text{O}$) yang tidak larut dalam air. Pembentukan senyawa-senyawa ini berlangsung lambat dan menyebabkan tanah menjadi lebih keras, lebih padat dan lebih stabil, sehingga dapat meningkatkan kekuatan tanah. Reaksi pozzolanic merupakan reaksi bergantung pada waktu dan temperature. Kekuatan maksimum campuran bertambah secara bertahap dan temperature yang tinggi lebih mempercepat reaksi.

Reaksi antara kapur dengan mineral lempung atau bahan pozzolan seperti silika hidrat dan air yang terdapat dalam tanah, akan terbentuk suatu *gel* kalsium silikat (CaSiO_3) yang mengikat butir-butir atau partikel tanah menjadi gumpalan-gumpalan (Ingels dan Metcalf, 1992). *Gel* silika tersebut akan mengikat dan melapisi partikel lempung menjadi kristal-kristal yang kemudian secara perlahan menjadi keras dan kuat serta menutupi pori-pori tanah sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah. Proses reaksi kimia pozzolanic adalah sebagai berikut (Wijaya, 1994 dalam Sujatmaka, 1998) :

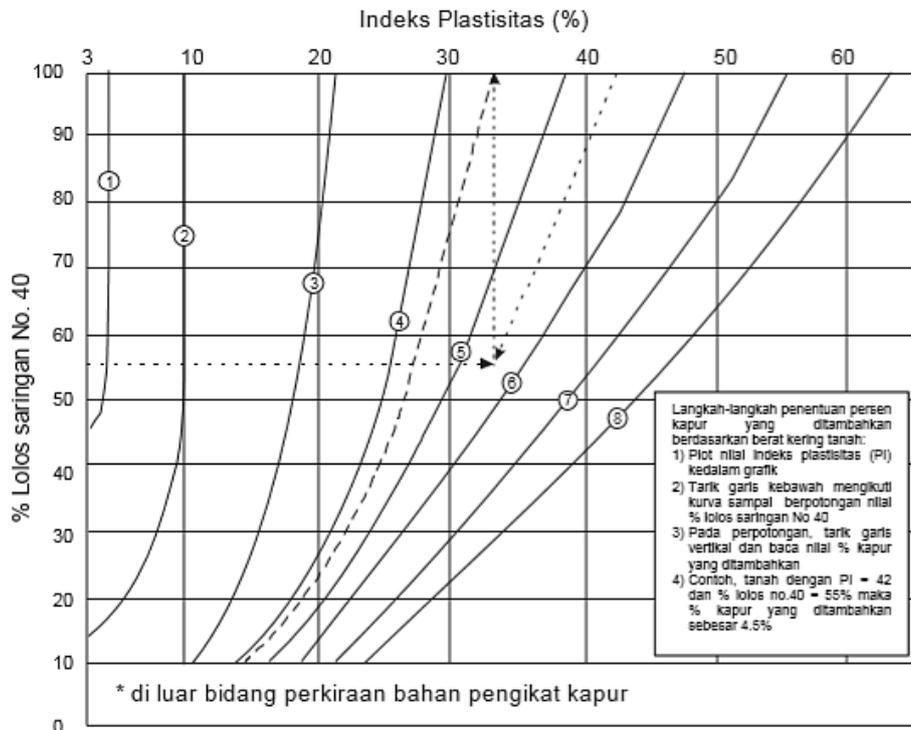


Gambar 2.1 menunjukkan terjadinya reaksi antara kalsium yang dikandung oleh kapur dan silika yang dikandung oleh lempung untuk membentuk CaSiO_3 yang berupa *gel* yang mengikat butiran tanah menjadu gumpalan-gumpalan; gumpalan-gumpalan tersebut berfungsi untuk memperbaiki gradasi dan sifat-sifat tanah menjadi lebih baik.

Untuk menentukan prosentase kapur yang akan dicampurkan dengan tanah, Departemen Pekerjaan Umum telah membuat pedoman berupa grafik hubungan antara Indeks Plastisitas (%), % lolos saringan No. 40 dan kadar kapur yang dibutuhkan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Pembentukan *gel* CaSiO_3 yang mengikat butiran lempung (Ingels dan Metcalf, 1992)



Keterangan gambar:

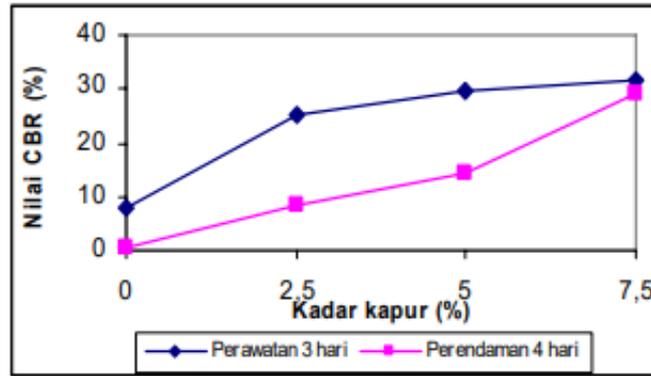
- a) ①, ②, dan seterusnya adalah kadar kapur;
- b) grafik ini tidak diperbolehkan untuk material yang lolos saringan No.40 lebih kecil 10% dan pada material pasir (Indeks Plastisitasnya kurang dari 3%);
- c) grafik ini berlaku untuk kapur yang kandungan kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) $\geq 90\%$ dan butiran yang lolos saringan No. 200 $\geq 85\%$.

Gambar 2.2 Penentuan perkiraan prosentase kapur yang dibutuhkan (PU, 2007)

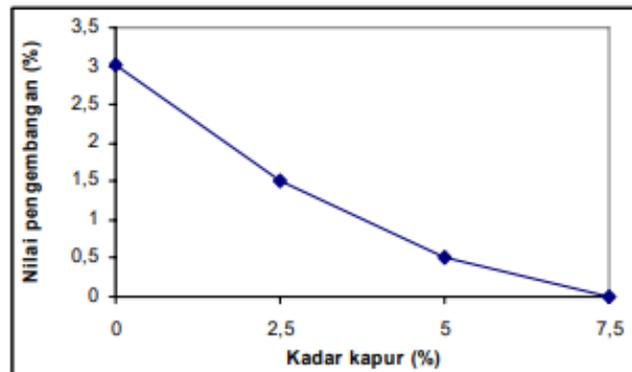
2.5 Perubahan Perilaku Tanah Setelah Distabilisasi

Penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi telah banyak digunakan baik pada tanah lempung lembek atau tanah ekspansif dengan hasil yang cukup memuaskan. Penelitian yang dilakukan oleh Suardi (2005) pada tanah lempung yang mempunyai *swelling potential* rendah dengan menambahkan kapur sebesar 15% nilai IP menjadi turun dari 29.62% menjadi 13.08%. Dengan kadar kapur optimum 10% dan masa perawatan 0 hari nilai $q_u = 1.62 \text{ kg/cm}^2$. Setelah masa perawatan 7 hari q_u meningkat menjadi 2.24 kg/cm^2 dan setelah masa perawatan 14 hari, q_u meningkat menjadi 2.45 kg/cm^2 .

Penelitian yang sama juga dilakukan oleh Wiqoyah (2006) dengan menambah kapur padam 7.5% pada tanah ekspansif dan IP = 49.44% pada perawatan 3 hari dan peredaman 4 hari dapat menaikkan nilai CBR 23.64% dan 28.78% (Gambar 2.3) dan juga dapat menurunkan nilai *swelling potential* sebesar 3.03% (Gambar 2.4).



Gambar 2.3 Hubungan antara persentase penambahan kapur dengan nilai CBR (Wiqoyah, 2006)



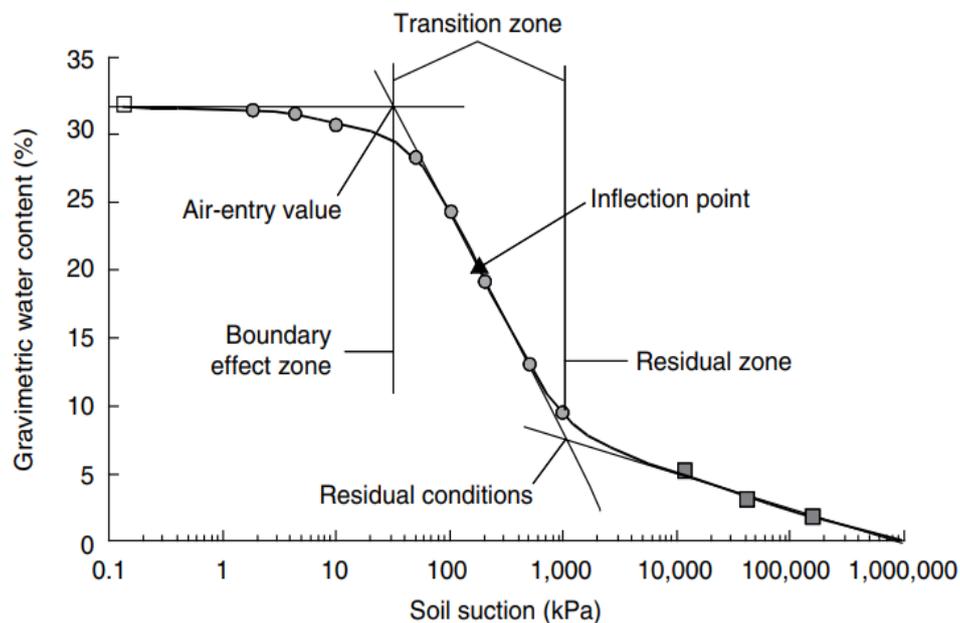
Gambar 2.4 Hubungan antara persentase penambahan kapur dengan nilai swelling potensial (Wiqoyah, 2006)

2.6 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) dan Suction

Soil water characteristic curve (SWCC) telah banyak dipergunakan dalam perhitungan karakteristik tanah tidak jenuh (Fredlund 1995, 2000). SWCC ini telah menjadi bahan penting dalam mekanika tanah tidak jenuh terutama dalam pembelajaran teknik geoteknik. Prosedur perhitungan karakteristik tanah tidak jenuh telah diusulkan pada hampir setiap proses fisik saat tanah menjadi tidak jenuh. (Fredlund 1995; 2000).

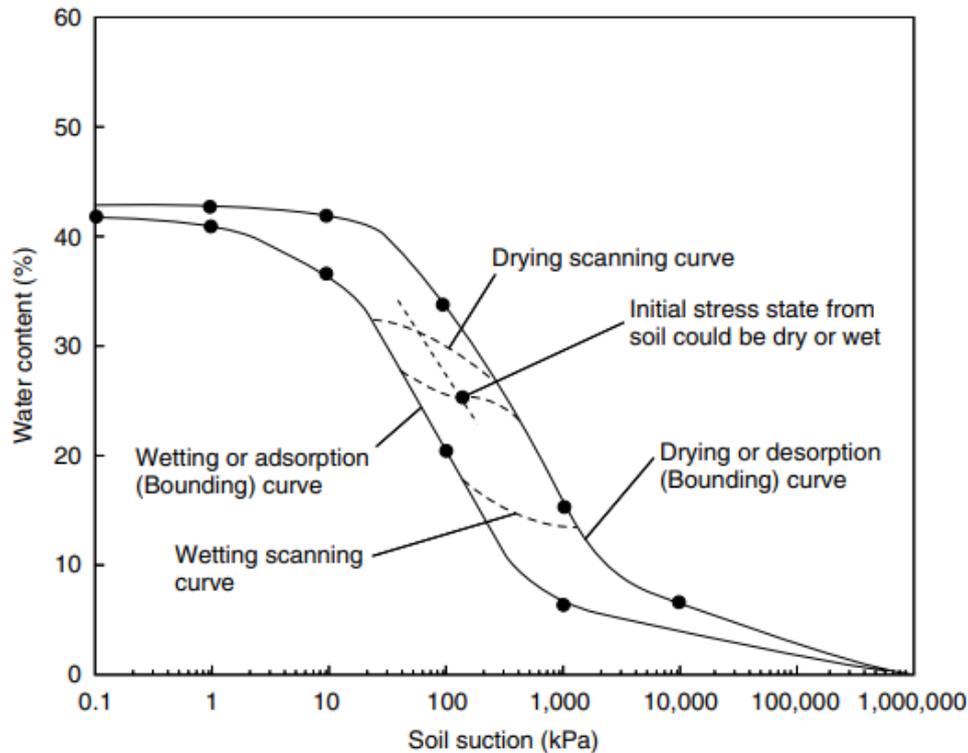
Data yang terkait pada SWCC diplot pada grafik hubungan antara kadar air dengan *suction*. Bentuk umum dari grafik SWCC dapat dilihat pada Gambar 2.5. Terdapat dua poin perbedaan yang sangat penting pada grafik tersebut (Fredlund 1995, 2000). Poin pertama adalah “*air entry value*” dari tanah, dimana adanya pori yang sangat besar mulai membuat tanah menjadi tidak jenuh. Poin kedua adalah “*residual condition*”, dimana pada poin ini menghilangnya air pada tanah akan menjadi lebih sulit. Perubahan pada kemiringan kurva pada

grafik dibagi menjadi tiga bagian; yang pertama adalah “*boundary effect zona*” yang memiliki nilai daerah *suction* rendah, yang kedua adalah “*transition zona*” yang memiliki daerah antara nilai *air entry value* dan *residual value*, dan yang terakhir adalah “*residual zona*” berada pada nilai *suction* yang tinggi yakni hingga 1.000.000 kPa. Semua grafik SWCC akan memberikan karakteristik yang sama seperti yang disebutkan diatas.



Gambar 2.5 Bentuk umum *Soil-Water Characteristic Curves* (SWCC) (Fredlund, 2000)

SWCC tidak hanya memiliki satu nilai, namun dapat berupa pola histeresis karena adanya proses pengeringan dan pembasahan pada Gambar 2.6 (Fredlund, 2000). Pola histeresis secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.6 yang terbentuk karena proses pengeringan dan pembasahan pada grafik SWCC pada tanah lanau dan pasir (Pham et al 2002). Hasil dari tiga percobaan pada satu tipe tanah yang sama menunjukkan keandalan dan produktivitas dalam percobaannya dilaboratorium. Pola histeresis antara proses pengeringan dan pembasahan terukur dalam tiga siklus yakni: siklus inisial pengeringan yang berawal kondisi jenuh, siklus pembasahan yang bermula dari nilai *suction* diatas nilai *residual suction*, dan siklus pengeringan lainnya setelah tanah mengalami pembasahan hingga mendekati nilai *suction nol*.



Gambar 2.6 Ilustrasi putaran histeresis dalam SWCC pada tanah. (Sumber: Fredlund, 2000)

2.7 Metode Besarnya Suction dalam Skala pF

Schofield (1935) memperkenalkan metode dalam menyatakan besarnya suction dalam skala pF. Penggunaan skala ini sering kali dilakukan. Jika suction pada tanah dinyatakan dalam bentuk tinggi kolom air pada tabung kapiler, maka logaritma ketinggian yang dinyatakan dalam satuan cm (centimeter) tersebut adalah ekuivalen dengan harga pF dari tanah tersebut yakni:

$$pF = \log [-u_w] \tag{2.1}$$

Dengan,

u_w : tinggi kolom air (cm)

Apabila nilai pF adalah 2 maka ketinggian air kapiler mencapai 100 cm diatas muka air tanah dan ekuivalen dengan tegangan sebesar 1 kg/cm^2 pada puncak kolom airnya (Yudayana, 2001).

Menurut Indarto (1991) besarnya hisapan dari grafik yang dinyatakan dalam angka pF, bila akan dinyatakan dalam tegangan air pori negatif maka nilai tersebut harus dikonversikan kedalam kPa atau kg/cm^2 . misal kan untuk suatu tanah yang akan diukur hisapannyadidapat nilai hisapan $pF=3$, maka nilai tersebut sama dengan tegangan air pori negatif 1 kg/cm^2 atau 100 kPa. Bila akan dinyatakan dalam tinggi kapiler, maka nilai hisapan pF dapat dikalibrasikan

dalam satuan cm. Misal $pF = 3$ senilai dengan $pF = \text{Log}(1000)$, bila dinyatakan dalam cm maka invers log 3 atau $10^3 = 1000$.

2.8 Stabilitas Lereng

Lereng merupakan bagian dari permukaan bumi yang berbentuk miring. Sedangkan kestabilan lereng merupakan suatu kondisi atau keadaan yang mantap/stabil terhadap suatu bentuk dan dimensi lereng (Duncan, et al, 2004). Desain geometri lereng dengan dimensi tertentu yang dilakukan dalam aktifitas pembuatan jalan raya adalah merupakan gangguan terhadap keseimbangan yang dapat mengakibatkan kelongsoran. Bentuk dari gangguan tersebut biasanya berupa proses degradasi atau gerakan - gerakan lain mulai dari rayapan sampai longsor. Proses degradasi atau gerakan-gerakan tersebut tidak akan berhenti sebelum mencapai suatu keadaan keseimbangan yang baru dalam bentuk dan dimensi yang baru pula (Duncan, et al, 2004).

Stabilitas atau kemantapan lereng dipengaruhi oleh gaya penggerak dan gaya penahan yang ada pada lereng tersebut. Gaya penggerak adalah gaya yang mempercepat terjadinya longsor pada lereng, sedangkan gaya penahan adalah gaya yang mempertahankan kemantapan dari suatu lereng. Jika gaya penahan lebih besar daripada gaya penggerak, maka lereng tersebut tidak akan mengalami gangguan atau dapat dikatakan bahwa lereng tersebut mantap (Das, 1998).

Secara alamiah, tanah atau lereng umumnya berada pada keseimbangan terhadap gaya-gaya yang bekerja. Apabila ada sesuatu hal yang mengakibatkan perubahan keseimbangan, maka tanah atau lereng akan berusaha untuk mencapai keseimbangan baru dengan cara degradasi atau pengurangan beban, terutama dalam bentuk longsor atau gerakan lain sampai tercapai keseimbangan baru. Gaya-gaya gravitasi dan rembesan (*seepage*) cenderung menyebabkan ketidakstabilan (*instability*) pada lereng alami, pada lereng yang dibentuk dengan cara penggalian, dan pada lereng tanggul serta bendungan tanah (Craig, 1991).

Cara yang digunakan untuk menghitung kemantapan lereng adalah suatu "*limit equilibrium method*" (cara keseimbangan batas), yaitu kita hitung besarnya kekuatan geser yang diperlukan untuk mempertahankan kemantapan dan kita bandingkan dengan kekuatan geser yang ada. Dari perbandingan ini kita mendapatkan faktor keamanan. Pada permulaan kita anggap bahwa akan terjadi kelongsoran pada suatu bidang gelincir tertentu, dan kita hitung gaya atau momen yang mencoba menyebabkan kelongsoran pada bidang tersebut akibat berat tanah. Ini disebut gaya penggerak (*sliding force*) atau momen penggerak (*turning moment*).

Selanjutnya dihitung gaya atau momen yang melawan kelongsoran akibat kekuatan geser tanah yang biasa di sebut momen melawan (*resisting moment*). Dengan menggabungkan kedua kedua momen ini kita dapat menentukan faktor keamanan terhadap kelongsoran pada bidang geser yang bersangkutan (Wesley, 1973).

Kuwano and Chen (1990) juga melaporkan bahwa kelongsoran yang terjadi pada tanah berlereng setelah hujan lebat, tidak hanya disebabkan oleh karena naiknya tegangan air pori seiring dengan naiknya permukaan air tanah, tetapi juga oleh berkurangnya kekuatan geser tanah akibat naiknya derajat kejenuhan tanah atau berkurangnya suction tanah. Berkurangnya suction tanah kelempungan akibat infiltrasi, secara umum pasti terjadi saat terjadi hujan. Air yang memasuki tanah yang kering berasal dari permukaan tanah, dengan jalan masuk yang tetap yaitu pori-pori tanah. Meskipun jumlah pori-pori dapat dianggap tetap, tetapi volume pori dapat berubah-ubah. Pada tanah lempung, swelling akibat pembasahan dapat mengurangi volume pori-pori tanah berukuran besar yang mempengaruhi laju infiltrasi dan kapasitas infiltrasi.

Pengaruh geometri lereng yang mengalami pembasahan, meliputi kemiringan lereng dan ketinggian lereng. Untuk pengaruh kemiringan, semakin curam lereng semakin kecil angka keamanan lereng. Untuk pengaruh ketinggian semakin tinggi lereng angka keamanan semakin kecil. Analisis kenaikan muka air tanah menyebabkan berkurangnya stabilitas lereng, untuk lereng dengan kemiringan 1:1, 1:2 dan 1:3 angka keamanannya bertambah besar. (I G. N. Wardana, 2011)

Umumnya, faktor keamanan stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2-1,5. Menurut Bowles (1989) nilai dari faktor keamanan berdasarkan intensitas kelongsorannya seperti Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Hubungan Faktor Keamanan dan Kejadian Longsor

Nilai Faktor Keamanan	Intensitas atau Kejadian Longsor
SF < 1,07	Longsor bisa terjadi/sering (Lereng Stabil)
1,07 < SF < 1,25	Longsor pernah terjadi (Lereng Kritis)
SF > 1,25	Longsor jarang terjadi (Lereng Relative Stabil)

Sumber : Bowles (1989)

Faktor keamanan lereng yang disyaratkan untuk analisis kestabilan lereng tanah diperlihatkan pada Tabel 2.5 dengan didasarkan pada pertimbangan biaya dan konsekuensi

kegagalan lereng terhadap tingkat ketidakpastian kondisi analisis. Dalam hal ini nilai faktor keamanan dipersyaratkan $SF > 1.25$.

Tabel 2.5 Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidak pastian kondisi analisis	
	Rendah ^a	Tinggi ^b
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	2,0 atau lebih
^a Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.		
^b Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika kondisi geologi sangat kompleks, kondisi tanah bervariasi, dan penyelidikan tanah tidak konsisten dan tidak dapat diandalkan.		

Sumber: SNI 8460:2017

2.9 Retakan pada Tanah

Retakan (*crack*) terjadi adalah akibat dari tidak seimbang kekuatan didalam massa tanah yang disebabkan oleh perbedaan kadar air, temperatur, atau pemadatan selama konstruksi (Fang, 1997). Retakan (*crack*) pada tanah yang mengalami pengeringan dapat dilihat berdasarkan suction dan properties tanah seperti modulus tekanan, *Poisson's ratio*, kekuatan geser, kekuatan tarik dan gaya *spesifik surface* (Morris et al., 1994). Kekuatan tanah secara mekanik adalah indikator penting dari properties fisik tanah yang menggambarkan karakteristik dari retakan tanah. (Nichols and Grismer., 1997).

Perubahan dari kelembaban dalam tanah terjadi sesuai dengan perubahan iklim dan pada waktu yang lama akan terjadi perpindahan air dari permukaan tanah. Penyusutan pada tanah menyebabkan retakan (*crack*) permukaan dan selanjutnya pembasahan dan pengembangan tanah menyebabkan retakan (*crack*) akan menutup kembali (Blight, 1997).

Variasi kadar air atau kehilangan air adalah parameter kunci untuk kontrol terhadap terjadinya retakan (*crack*) awal dan penyebarannya. Disamping itu untuk tanah tertentu kehilangan air atau besarnya penguapan sangat tergantung pada temperatur dan kelembaban. Menyusutnya tanah adalah akibat perubahan tegangan dalam tanah (Wei, 2014).

2.10 Persyaratan Timbunan Biasa

Menurut Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Modul-4 Spesifikasi Pekerjaan Tanah 2016, bahan timbunan biasa harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut :

- Bahan yang dipilih sebaiknya tidak termasuk tanah yang berplastisitas tinggi, yang diklasifikasikan sebagai A-7-6 menurut AASHTO M145 atau sebagai CH menurut "Unified atau Casagrande Soil Classification System".
- Bila penggunaan tanah yang berplastisitas tinggi tidak dapat dihindarkan, bahan tersebut harus digunakan hanya pada bagian dasar dari timbunan atau pada penimbunan kembali yang tidak memerlukan daya dukung atau kekuatan geser yang tinggi. Tanah plastis seperti itu sama sekali tidak boleh digunakan pada 30 cm lapisan langsung di bawah bagian dasar perkerasan atau bahu jalan atau tanah dasar bahu jalan.
- Bahan timbunan bila diuji dengan SNI 03-1744-1989, harus memiliki CBR tidak kurang dari 6 % setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100 % kepadatan kering maksimum (MDD) seperti yang ditentukan oleh SNI 03-1742-1989.
- Tanah sangat expansive yang memiliki nilai aktif lebih besar dari 1,25 atau derajat pengembangan yang diklasifikasikan oleh AASHTO T258 sebagai "very high" atau "extra high", tidak boleh digunakan sebagai bahan timbunan.
- Nilai aktif adalah perbandingan antara Indeks Plastisitas / PI - (SNI 03-1966-1989) dan persentase kadar lempung (SNI 03-3422-1994).

2.11 Program Geostudio 2012 (SLOPE/W)

Slope/W merupakan suatu software yang menggunakan teori keseimbangan batas (*limit equilibrium theory*) yang digunakan dalam menganalisa stabilitas lereng dan menghitung nilai faktor keamanan tanggul. Secara umum, metode analisis stabilitas lereng yang digunakan dalam Slope/W mengikuti beberapa metode yang ada, diantaranya metode Ordinary (Fellenius), metode Bishop, metode Janbu, metode Spencer, metode Morgenstern-Price, metode Crops of Engineering, metode Lowe-Karafiath, metode keseimbangan batas, dan metode tekanan terbatas.

Slope/W merupakan perumusan yang menggabungkan dua persamaan faktor keamanan yaitu gaya keseimbangan dan momen irisan. Berdasarkan pemakaian persamaan gaya antar irisan, faktor keamanan untuk semua metode dapat ditentukan dengan menggunakan dua persamaan tersebut. Slope/W terintegrasi dengan Seep/W, Vadose/W, Sigma/W, dan Quake/W. Sebagai contoh, untuk menentukan faktor keamanan suatu lereng yang dipengaruhi oleh adanya tekanan air pori, analisis stabilitas dapat menggunakan data hasil perhitungan Seep/W. Pemodelan dengan menggunakan *SLOPE/W* untuk mengetahui kestabilan tanggul telah dilakukan oleh peneliti Angga Ahmad, dkk (2014).

Angga Ahmad, dkk (2014) melakukan studi analisis stabilitas tanggul yang distabilisasi akibat musim hujan dan musim kemarau di Sungai Bengawan Solo, Bojonegoro. Sungai Bengawan Solo adalah salah satu sungai yang memiliki tanggul dengan daya dukung dan kekuatan rendah. Untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan tanah tanggul tersebut maka dilakukan stabilisasi tanah secara kimiawi di laboratorium, untuk lokasi tanggul ruas B1 kadar optimum untuk kapur, fly ash, dan biobakteri masing-masing yaitu 8%, 15%, dan 5%. Untuk lokasi tanggul ruas B2 kadar optimum untuk kapur, fly ash, dan biobakteri masing-masing yaitu 6%, 10%, dan 7%. Hasil analisis stabilitas tanggul menggunakan program bantu (*Geo-slope*) didapatkan nilai safety factor (SF) pada tanah natural $SF < 1$ untuk lokasi ruas B1 dan ruas B2 dengan tinggi muka air sungai setinggi tanggul. Hal ini menunjukkan kondisi tanggul tidak aman. Setelah distabilisasi menggunakan kapur, fly ash, dan biobakteri nilai safety factor meningkat menjadi $SF > 1$. Hal itu menunjukkan kondisi tanggul menjadi lebih aman setelah distabilisasi.

2.12 Program *PLAXIS 2D*

Analisis elemen hingga (FE) merupakan salah satu dari solusi perhitungan numerik. Salah satu program untuk perhitungan numerik adalah *PLAXIS* yang terdiri dari *PLAXIS 2D* dan *3D*. Pemodelan dengan menggunakan *PLAXIS 2D* untuk kasus penurunan telah dilakukan oleh peneliti Andra dan Hendriyawan (2013). Program *PLAXIS 2D* adalah program pemodelan tanah yang menggunakan dasar teori metode elemen hingga untuk memperoleh hasil desain perhitungan yang dibutuhkan dengan menginput parameter-parameter tanah dan elemen lain yang berperan dalam pekerjaan konstruksi untuk perhitungan tersebut.

Andra dan Hendriyawan (2013) melakukan studi tentang analisis penimbunan tanah serta pembuatan tanggul untuk reklamasi. Pemodelan menggunakan *PLAXIS*, tahapan penimbunan dibagi menjadi hanya 2 tahap karena *PLAXIS* tidak juga memperhitungkan faktor bentuk dari timbunan, sehingga kemungkinan besar, selisih 0.2m dalam dari

penimbunan tahap 2 dan 3 pada perhitungan manual dapat didukung oleh tanah dasar, dan dengan menggunakan Program *PLAXIS* untuk menghitung *Immediate Settlement* akibat sifat elastis. *Immediate Settlement* terjadi sebesar 11.7 cm setelah seluruh tahapan penimbunan serta pemasangan armor. Selain untuk menghitung penurunan, *PLAXIS* juga digunakan untuk mengecek faktor keamanan dari tiap tahapan timbunan. Nilai faktor keamanan dikatakan tidak aman (runtuh) pada saat $SF < 1$, sehingga berdasarkan nilai faktor keamanan, seluruh tahapan konstruksi timbunan dalam kondisi aman meskipun hanya dilakukan dalam 2 tahap. Pemodelan menggunakan *PLAXIS* mengizinkan tanah tidak runtuh apabila hanya dengan dua tahap. Hal ini disebabkan oleh pemodelan menggunakan *PLAXIS* memperhitungkan faktor bentuk dari timbunan sementara persamaan kestabilan daya dukung tanah tidak.

2.13 Peneliti Terdahulu

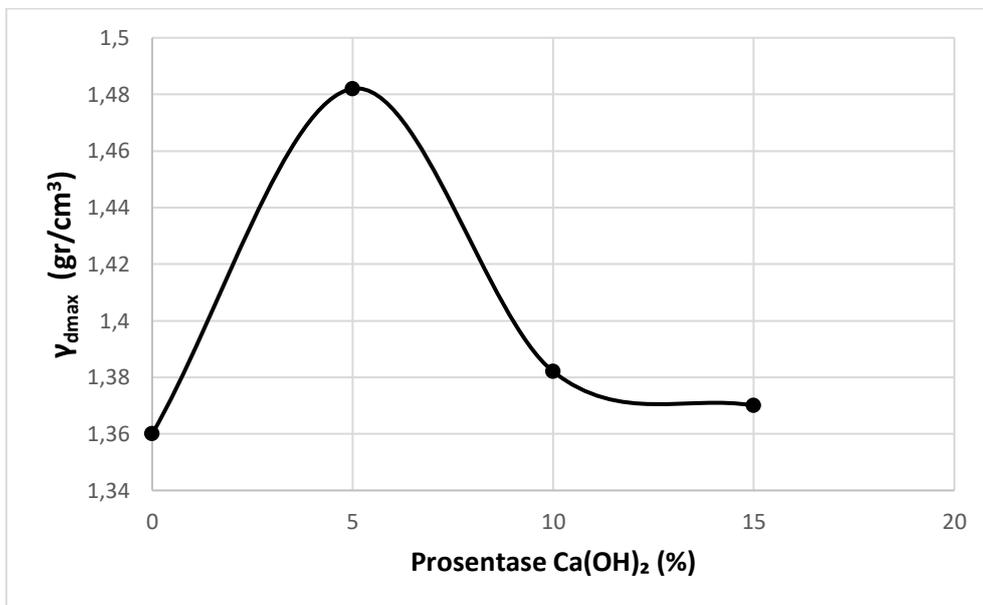
Iis Faizah (2013) dalam tesisnya melakukan penelitian pada tanah yang diambil dari Lumpur Sidoarjo, di Porong, Jawa Timur dengan melakukan pencampuran LuSi dengan bahan *additive* yaitu Kapur Mati Ca(OH)_2 . Dari kondisi LuSi dalam keadaan awal (*initial*) untuk melihat akibat dari pencampuran dengan bahan *additive* pada perubahan sifat fisik dan mekanis tanah tersebut.

Pengujian parameter fisik yang dilakukan pada LuSi kondisi *initial* yaitu: analisa saringan, plastisitas (batas cair dan batas plastis), *specific gravity* (Gs) dan uji pemadatan. Dari hasil analisa saringan, butiran LuSi yang lolos ayakan no 200 adalah 99.33%, dan memiliki plastisitas cukup tinggi (LL = 81,58% dan IP = 49,02%). Apabila diklasifikasikan menggunakan metode USCS (*Unified Soil Classification System*) LuSi tersebut tergolong sebagai tanah lempung dengan plastisitas tinggi (CH-Soil). Berdasarkan hasil tes pemadatan, LuSi mempunyai kadar air optimum ($W_{c_{opt}} = 25,27\%$) dan kepadatan maksimum ($\gamma_{dmax} = 1,36 \text{ gr/cm}^3$). Mengingat lokasi endapan LuSi yang sangat tidak memungkinkan untuk dilakukan pengambilan sample dalam kondisi *undisturbed* (tidak terganggu). Oleh karena itu, nilai kepadatan tanah (γ_t) dan angka pori (e) initial tidak dapat dicari, sehingga harga Sr (derajat kejenuhan) juga tidak dapat dihitung. Untuk mengetahui parameter teknis LuSi maka dilakukan pengujian yang meliputi sudut geser dan kohesi yang diperoleh dari test direct shear. Dari hasil pengujian tersebut diketahui bahwa LuSi juga mempunyai kekuatan yang sangat rendah dimana harga kohesi = $0,02 \text{ kg/m}^2$ dan sudut geser dalam 53,680.

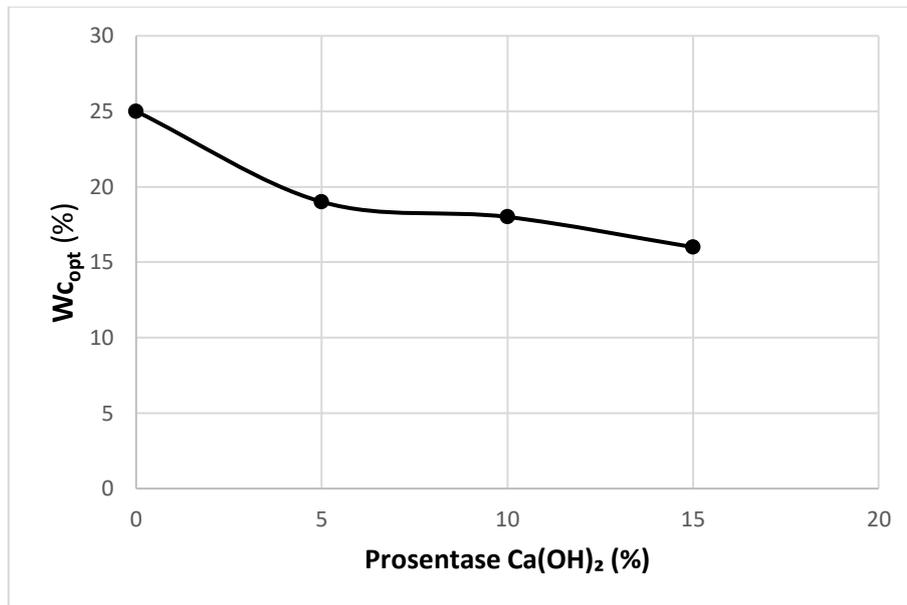
Untuk mengetahui pengaruh prosentase kandungan kapur Ca(OH)_2 dan umur stabilisasi terhadap sifat fisik dan sifat teknis LuSi, maka dilakukan pengujian parameter fisik yang meliputi kepadatan maksimum (γ_{dmax}) dan kadar air optimum ($W_{c_{opt}}$) yang diperoleh dari tes

pemadatan, batas cair (LL), batas plastisis (PL), dan *specific gravity* (Gs). Sedangkan parameter teknisnya yaitu: sudut geser dan kohesi yang diperoleh dari test direct shear.

LuSi yang distabilisasi dengan kapur Ca(OH)_2 pada prosentase berbeda memiliki kepadatan maksimum dan kadar air optimum seperti yang diberikan pada Gambar 2.7. Kepadatan mengalami kenaikan yang sangat berarti pada prosentase penambahan kapur Ca(OH)_2 sebesar 5%, tetapi penambahan prosentase kapur Ca(OH)_2 berikutnya menyebabkan terjadinya penurunan kepadatan tanah yang akhirnya hampir konstan (Gambar 2.7.a). Hal ini menunjukkan bahwa pada pemberian 5% kapur Ca(OH)_2 , pembentukan gel CaSiO_3 cukup mengisi pori LuSi dan membungkus butiran solid LuSi tersebut. Hanya saja, pada penambahan kapur menjadi 10% dan 15% ternyata tidak cukup terbentuk gel baru karena air yang diserap juga sedikit (lihat Gambar 2.7.b); sebagai akibatnya kepadatan tanah LuSi menurun.



(a)

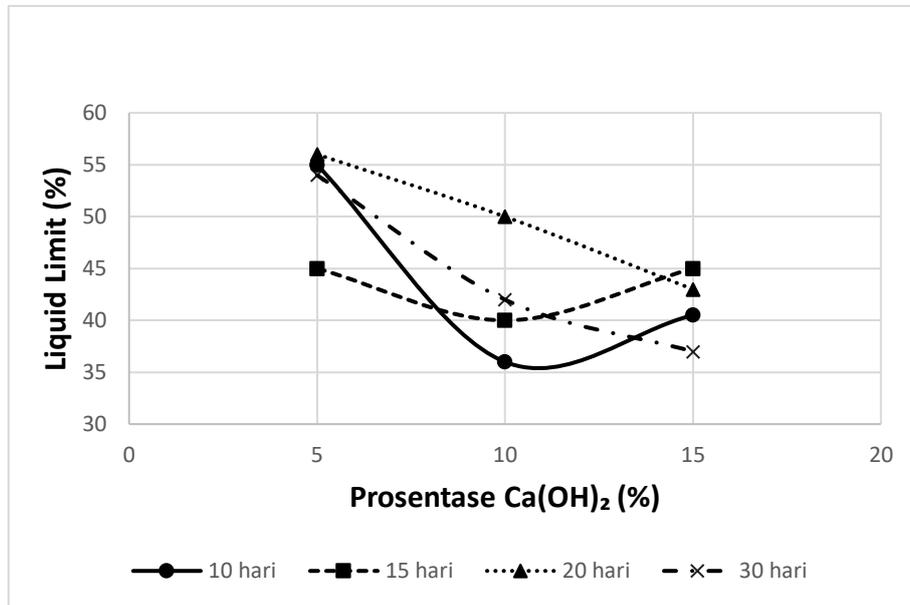


(b)

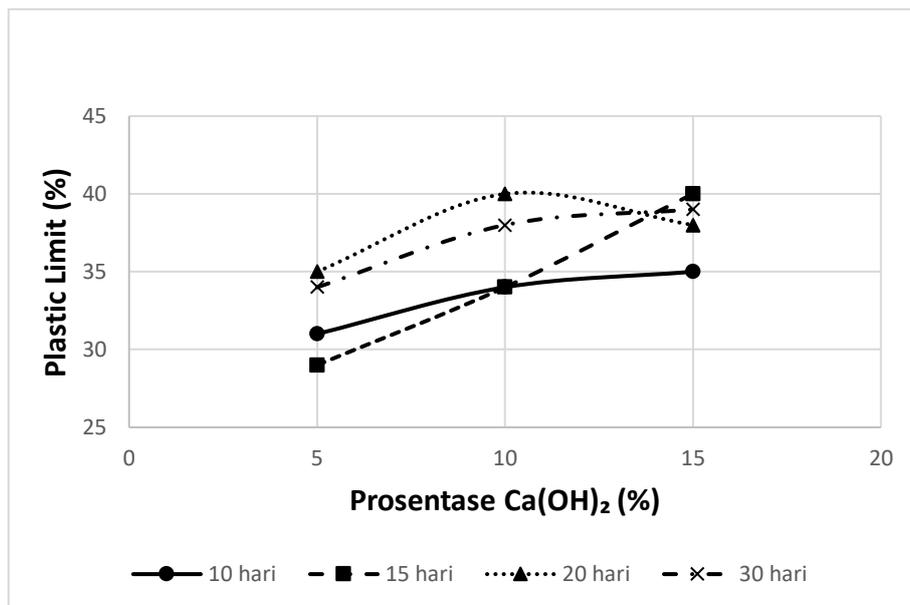
Gambar 2.7 Kurva hasil pemadatan LuSi yang distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂ pada prosentase yang berbeda: a) berat volume kering maksimum; b) kadar air optimum (Iis Faizah, 2013)

Harga batas cair (LL) initial LuSi adalah sebesar 81,58%. Dalam Gambar 2.8 ditunjukkan perilaku plastisitas LuSi yang distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂. Nilai batas cair (LL) dari kondisi initial LuSi mengalami penurunan yang sangat besar setelah distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂ dan semakin besar prosentase kapur Ca(OH)₂ nilai LL juga makin turun (Gambar 2.8.a). Kondisi ini disebabkan terjadinya reaksi antara silika yang ada pada LuSi dengan kapur Ca(OH)₂. Reaksi tersebut membentuk gel CaSiO₃ yang membungkus gumpalan butiran solid LuSi sehingga gumpalannya menjadi lebih besar dan nilai LL nya turun. Disamping itu karena kapur menggantikan kation sodium (Na⁺) atau potassium (K⁺) yang ada pada partikel LuSi yang mengakibatkan nilai LL turun. Kondisi LL ini berbeda dengan Plastic Limit (PL) yang makin besar dengan bertambahnya prosentase kapur Ca(OH)₂ (Gambar 2.8.b) dan sebagai akibatnya nilai Plasticity index (PI) makin kecil dengan bertambahnya prosentase kapur Ca(OH)₂ (Gambar 2.8.c). Penurunan nilai plastisitas dengan makin besarnya prosentase CaCO₃ ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan Suardi (2005). Harga LL, PL dan IP mengalami fluktuasi pada umur stabilisasi kurang dari 20 hari dan akan stabil bahkan cenderung menurun pada umur stabilisasi lebih besar dari 20 hari, (2.9.a, 2.9.b, 2.9.c). Hal ini disebabkan pembentukan gel CaSiO₃ belum sempurna sehingga terjadi fluktuasi harga LL, PL dan IP, kemudian pada umur 20 hari gel CaSiO₃ yang terbentuk sudah mengeras dan menjadi

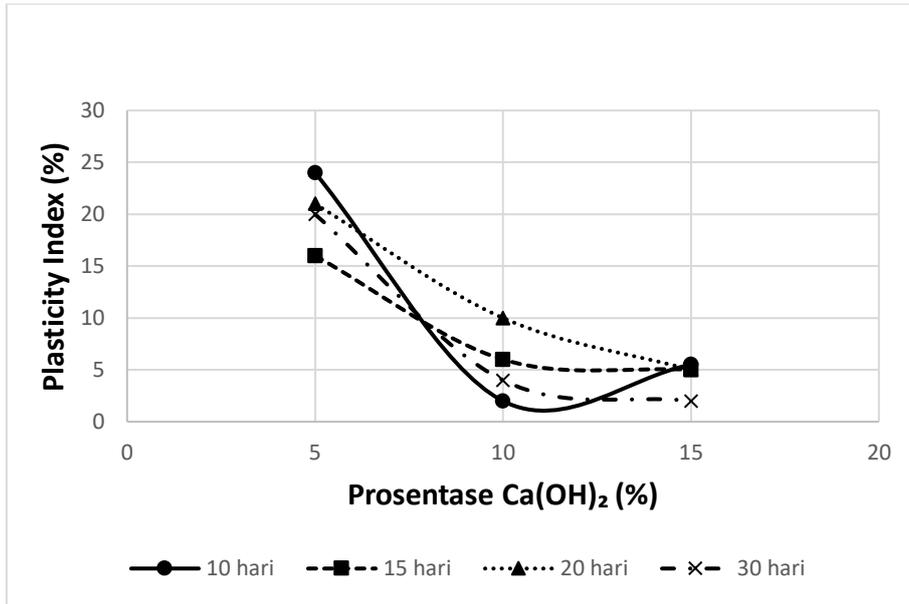
kristal yang dapat membungkus gumpalan butiran solid LuSi sehingga gumpalannya menjadi lebih besar dan menyebabkan nilai LL, PL dan IP mengalami penurunan. Jadi, berdasarkan penjelasan di atas maka prosentase kapur Ca(OH)_2 yang optimum adalah sebesar 10% dengan umur stabilisasi 20 hari.



(a)

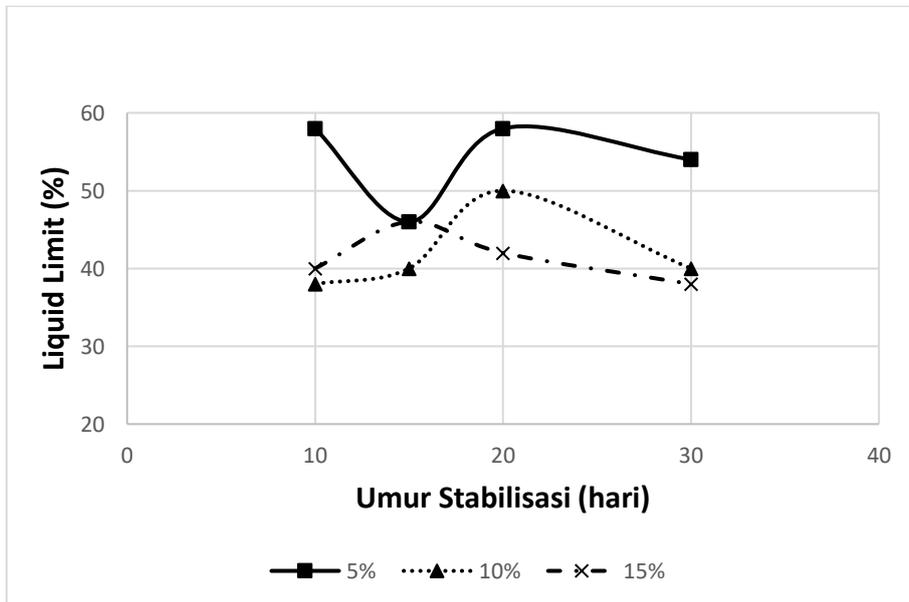


(b)

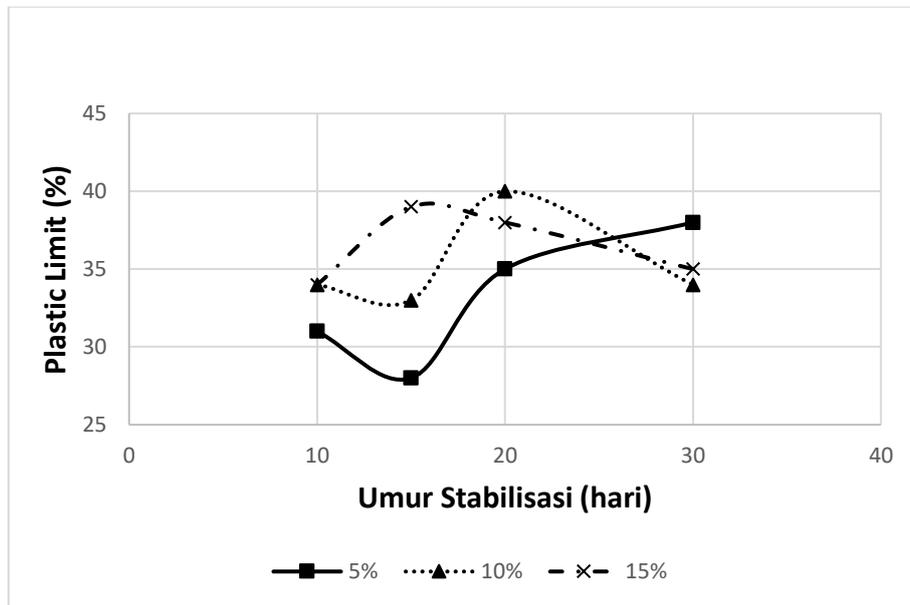


(c)

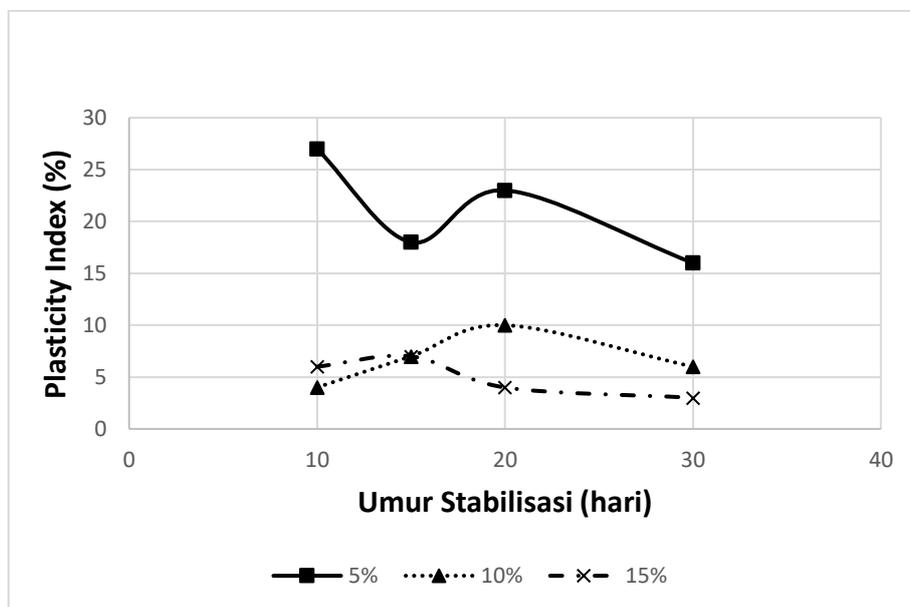
Gambar 2.8 Pengaruh prosentase kapur Ca(OH)₂ terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Iis Faizah, 2013)



(a)



(b)

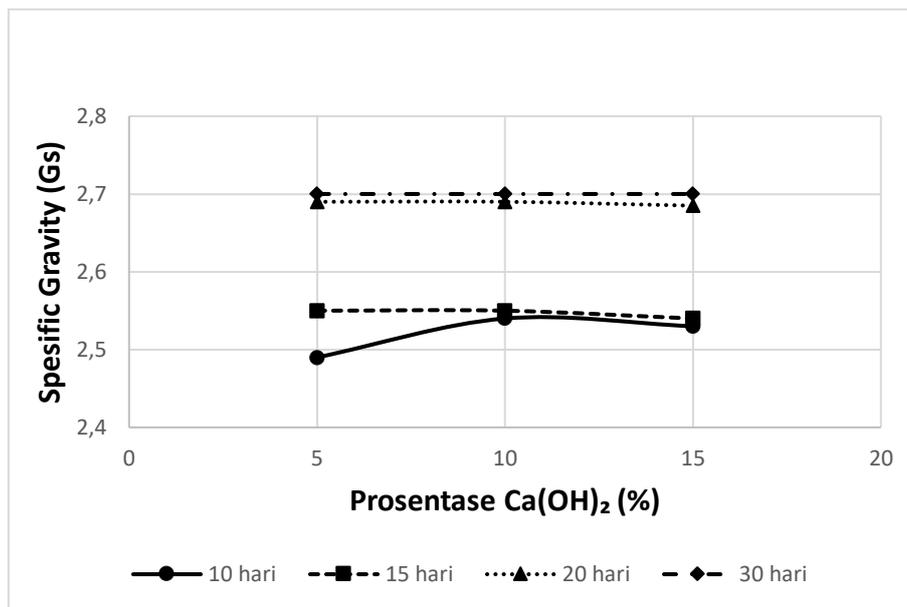


(c)

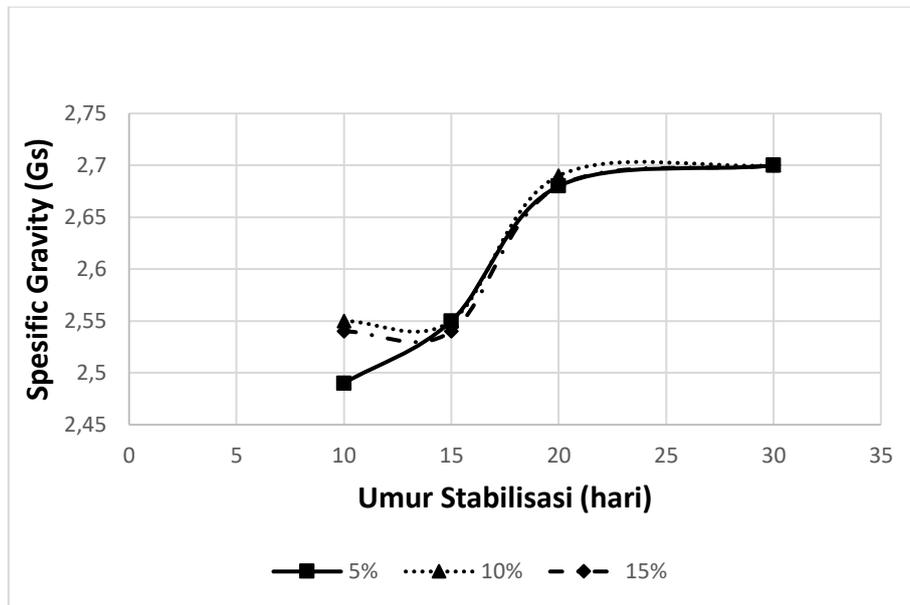
Gambar 2.9 Pengaruh umur stabilisasi terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Iis Faizah, 2013)

Harga G_s pada kondisi initial LuSi adalah 2,52. Setelah distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂ harga G_s akan mengalami kenaikan dengan bertambahnya prosentase Ca(OH)₂ (Gambar 2.10). Hal ini disebabkan terjadinya reaksi antara silika yang ada pada LuSi dengan kapur Ca(OH)₂. Reaksi tersebut membentuk gel CaSiO₃ yang membungkus gumpalan butiran solid LuSi sehingga berat butiran solidnya bertambah dan menyebabkan harga G_s naik. Hal ini

berarti perbandingan berat kristal CaSiO_3 lebih besar dibandingkan dengan berat air yang mempunyai volume sama dengan volume kristal CaSiO_3 sehingga G_s nya naik. Gambar 2.11 menunjukkan bahwa harga G_s mengalami kenaikan dengan makin bertambahnya umur stabilisasi, dan pada umur stabilisasi lebih dari 20 hari harga G_s menjadi konstan. Hal ini semakin memperkuat analisis parameter LL, PL dan IP yang telah dibahas sebelumnya bahwa waktu yang dibutuhkan untuk membuat gel CaSiO_3 mengeras dan menjadi kristal adalah pada umur stabilisasi 20 hari. Jadi, berdasarkan penjelasan di atas maka prosentase kapur Ca(OH)_2 yang optimum adalah sebesar 10% dengan umur stabilisasi 20 hari.

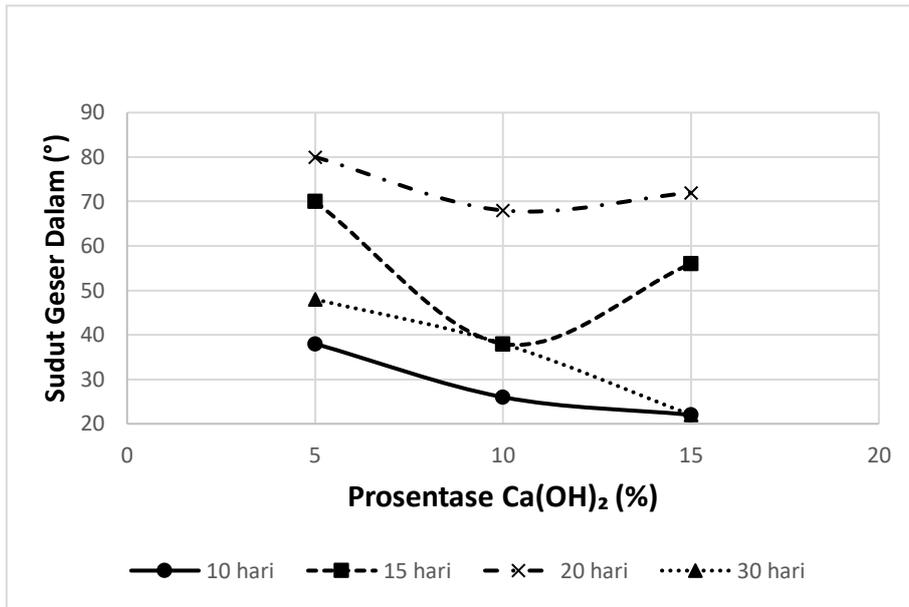


Gambar 2.10 Pengaruh prosentase Ca(OH)_2 terhadap *Specific Gravity* (Iis Faizah, 2013)

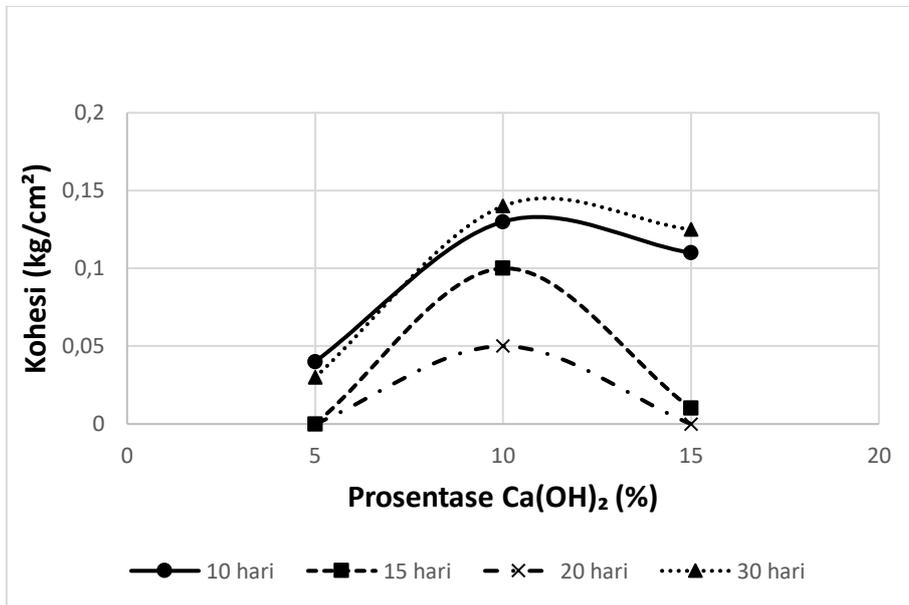


Gambar 2.11 Pengaruh umur stabilisasi terhadap *Specific Gravity* (Iis Faizah, 2013)

Harga sudut geser dalam dan kohesi initial LuSi masing-masing adalah 53,680 dan 0,02 kg/cm². Setelah distabilisasi dengan kapur Ca(OH)₂ nilai sudut geser dalam mengalami penurunan pada penambahan prosentase kapur Ca(OH)₂ 5% menjadi 10% kemudian pada prosentase 15% nilai sudut geser dalam sedikit naik (Gamabar 2.12.a). Hal ini berarti pembentukan gel sudah maksimum pada prosentase kapur Ca(OH)₂ sebesar 5%. Sebagai akibatnya penambahan kapur Ca(OH)₂ hanya berfungsi sebagai filler saja dan bukan untuk membentuk gel CaSiO₃. Perilaku sudut geser dalam ini berbanding terbalik dengan nilai kohesi, dimana nilai kohesi terus meningkat dengan makin bertambahnya prosentase kapur Ca(OH)₂ yang ditambahkan (Gambar 2.12.b). Pada Gambar 2.13.a dan 2.13.b terlihat bahwa kenaikan sudut geser maksimum terjadi pada umur stabilisasi 20 hari sedangkan nilai kohesinya minimum. Hal ini semakin membuktikan bahwa reaksi pembentukan gel CaSiO₃ sudah selesai dan gel tersebut sudah mengeras dan menjadi kristal yang mampu membungkus butiran solid LuSi menjadi lebih besar dan kuat, sehingga nilai sudut geser dalamnya naik dan kohesinya turun. Akan tetapi setelah umur stabilisasi melebihi 20 hari, secara perlahan nilai sudut geser turun dan kohesinya meningkat. Hal ini disebabkan reaksi pembentukan gel CaSiO₃ masih berlangsung, akan tetapi karena air yang terkandung didalamnya semakin kering dengan bertambahnya umur stabilisasi maka butiran solidnya tidak sempurna lagi untuk menahan gaya geser sehingga mudah hancur dan nilai sudut gesernya kecil. Jadi, berdasarkan penjelasan di atas maka prosentase kapur Ca(OH)₂ yang optimum adalah sebesar 10% dengan umur stabilisasi 20 hari.

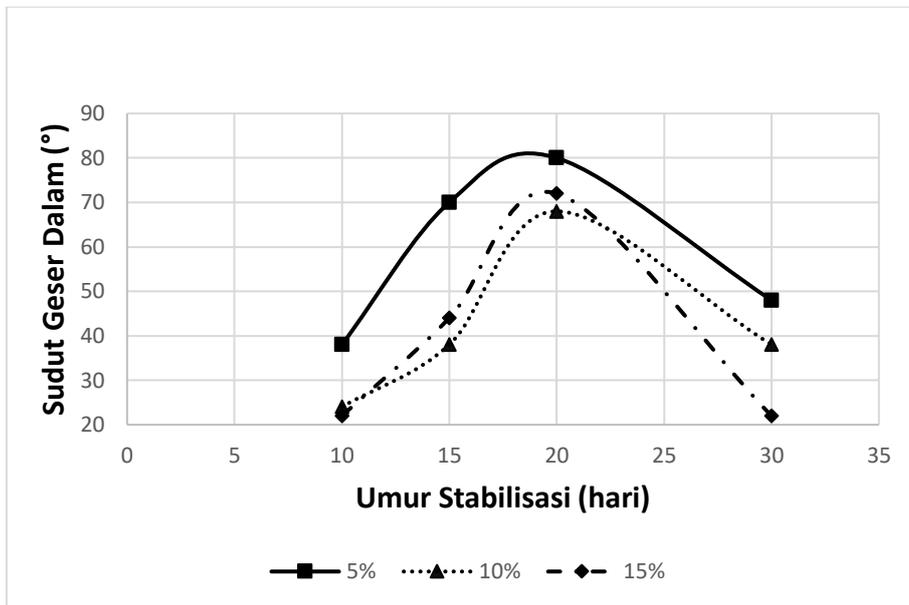


(a)

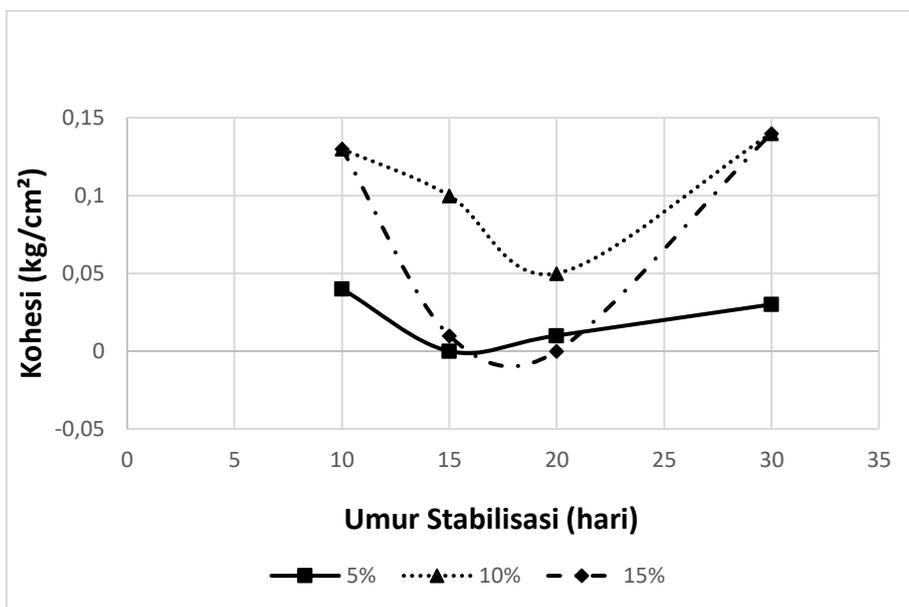


(b)

Gambar 2.12 Pengaruh prosentase Ca(OH)₂ terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) kohesi (Iis Faizah, 2013)



(a)



(b)

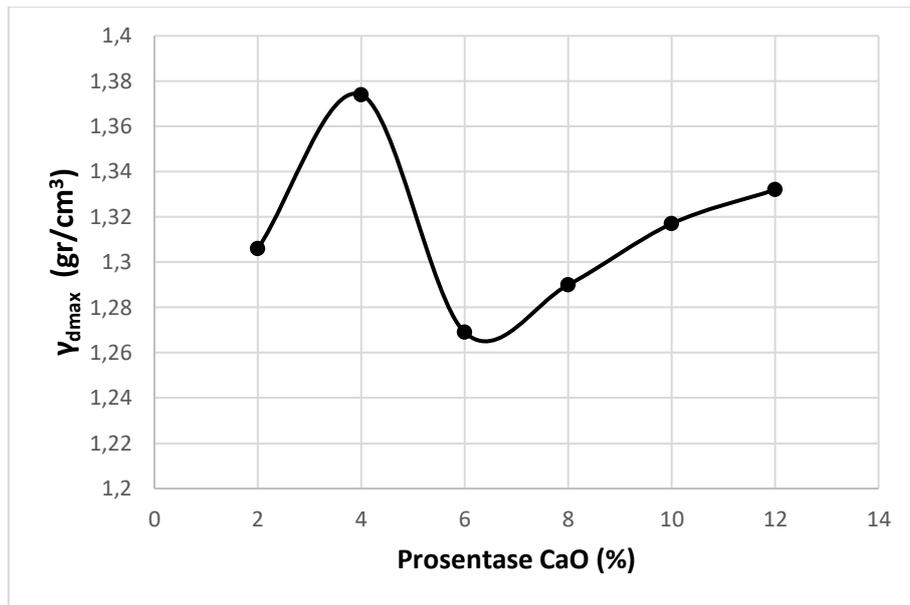
Gambar 2.13 Pengaruh umur stabilisasi terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) koheesi (Iis Faizah, 2013)

Iis Faizah (2013), menyimpulkan dari hasil analisa di atas bahwa prosentase optimum bahan additive Ca(OH)_2 adalah sebesar 10% dengan umur stabilisasi 20 hari. Maksud dari umur stabilisasi tersebut adalah untuk menentukan pada hari keberapa perubahan sifat fisik maupun mekanik mencapai keadaan konstan sehingga dapat diketahui bahwa proses sementasi antar butiran telah tercapai. Identifikasi dilakukan dengan pengujian karakteristik fisik dan

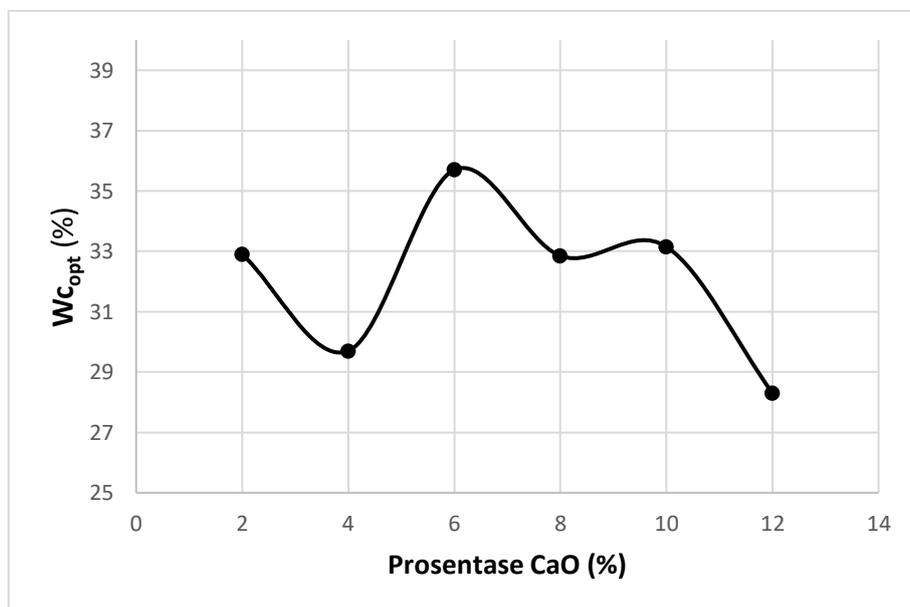
mekanik selama 10, 15, dan 20 hari. Hal ini memungkinkan pada saat pemeraman akibat reaksi antara kapur aktif atau kapur mati dan tanah yang menghasilkan energi panas karena pengaruh pembentukan CaSiO_3 .

Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR (2018) melakukan penelitian pada Lumpur Sidoarjo dari Porong dengan melakukan stabilisasi dengan proses kimia yaitu Kapur Hidup (CaO). Hasil dari penelitian pada LuSi yang distabilisasi dengan CaO adalah sebagai berikut pada prosentase berbeda memiliki kepadatan maksimum dan kadar air optimum seperti yang diberikan pada Gambar 2.14. Kepadatan mengalami kenaikan yang sangat berarti pada prosentase penambahan kapur CaO sebesar 4%, tetapi penambahan prosentase kapur CaO berikutnya menyebabkan terjadinya penurunan kepadatan tanah pada prosentase 6%, kemudian kembali naik pada prosentase 8% - 12% (Gambar 2.14.a). Hal ini menunjukkan bahwa pada pemberian 4% kapur CaO , terjadinya proses sementasi antar butiran LuSi sehingga membungkus butiran terbentuk gumpalan partikel yang lebih besar (butiran lebih bersifat seperti material granular) yang akan menurunkan kadar air dan muatan permukaan yang lebih kecil.

Pada Gambar 2.14.b dapat dilihat bahwa kadar air bernilai minimum pada saat kadar kapur 4%. Hal ini disebabkan terjadinya proses sementasi antar butiran LuSi sehingga terbentuk gumpalan partikel yang lebih besar (butiran lebih bersifat seperti material granular) yang akan menurunkan kadar air dan akibatnya akan menurunkan plastisitas tanah. Pada penambahan kapur menjadi 8% hingga 10% ternyata cukup terbentuk gel baru karena air yang diserap juga banyak (lihat Gambar 2.14.b); sebagai akibatnya kepadatan tanah LuSi mengalami kenaikan. Hanya saja, pada penambahan kapur menjadi 12% ternyata tidak cukup terbentuk gel baru karena air yang diserap juga sedikit (lihat Gambar 2.14.b); sebagai akibatnya kadar air LuSi menurun. Jadi, berdasarkan penjelasan di atas maka prosentase kapur CaO yang optimum adalah sebesar 4%.



(a)

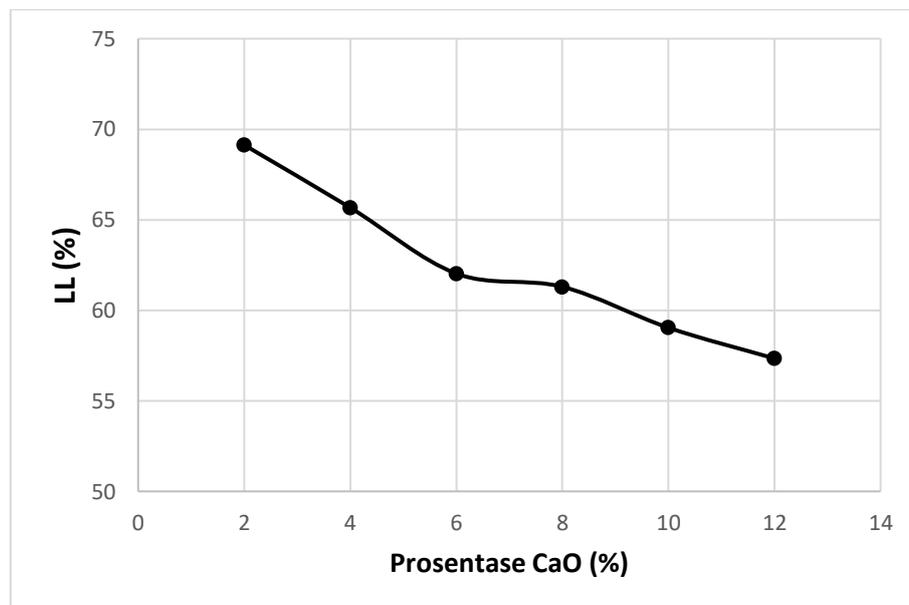


(b)

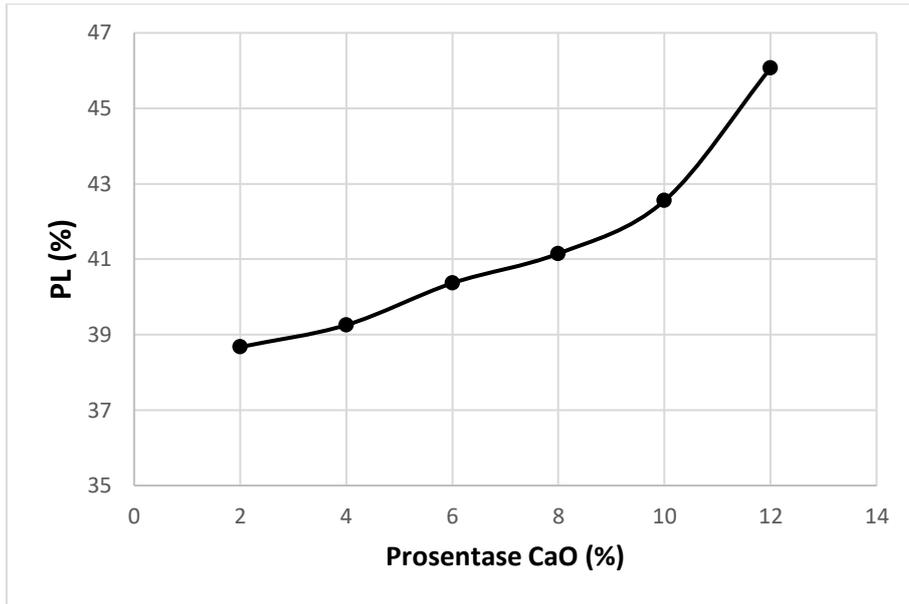
Gambar 2.14 Kurva hasil pemadatan LuSi yang distabilisasi dengan kapur CaO pada prosentase yang berbeda: a) berat volume kering maksimum; b) kadar air optimum (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)

Harga batas cair (LL) initial LuSi adalah sebesar 72,60%. Dalam Gambar 2.15 ditunjukkan perilaku plastisitas LuSi yang distabilisasi dengan kapur CaO. Nilai batas cair (LL) dari kondisi initial LuSi mengalami penurunan yang sangat besar setelah distabilisasi dengan kapur CaO dan semakin besar prosentase kapur CaO nilai LL juga makin turun

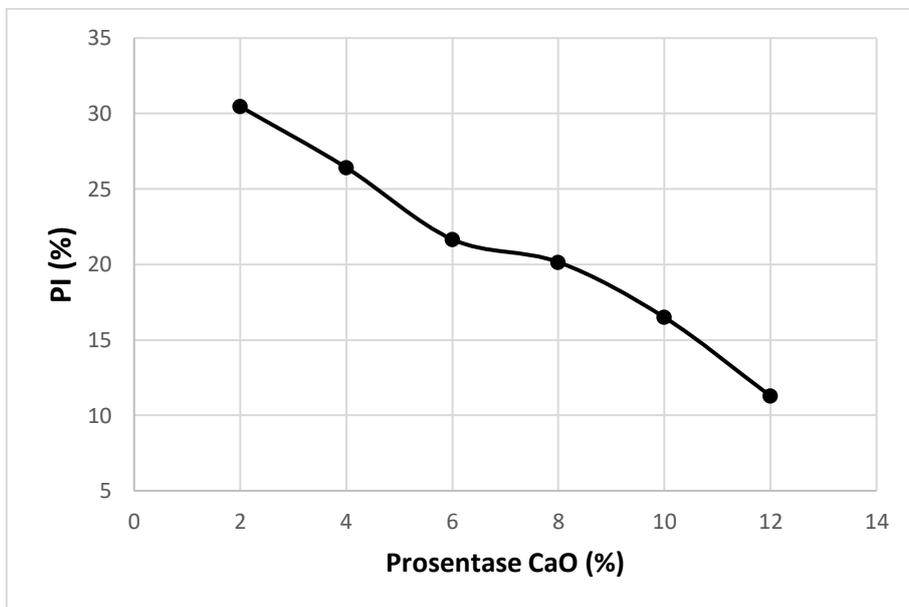
(Gambar 2.15.a). Kondisi ini disebabkan terjadinya reaksi antara silika yang ada pada LuSi dengan kapur CaO. Reaksi tersebut membentuk gel CaSiO_3 yang membungkus gumpalan butiran solid LuSi sehingga gumpalannya menjadi lebih besar dan nilai LL nya turun. Disamping itu karena kapur menggantikan kation sodium (Na^+) atau potassium (K^+) yang ada pada partikel LuSi yang mengakibatkan nilai LL turun. Kondisi LL ini berbeda dengan Plastic Limit (PL) yang makin besar dengan bertambahnya prosentase kapur CaO (Gambar 2.15.b) dan sebagai akibatnya nilai Plasticity index (PI) makin kecil dengan bertambahnya prosentase kapur CaO (Gambar 2.15.c). Jadi, berdasarkan penjelasan di atas bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan Iis Faizah (2013), penurunan nilai plastisitas dengan makin besarnya prosentase kapur.



(a)



(b)

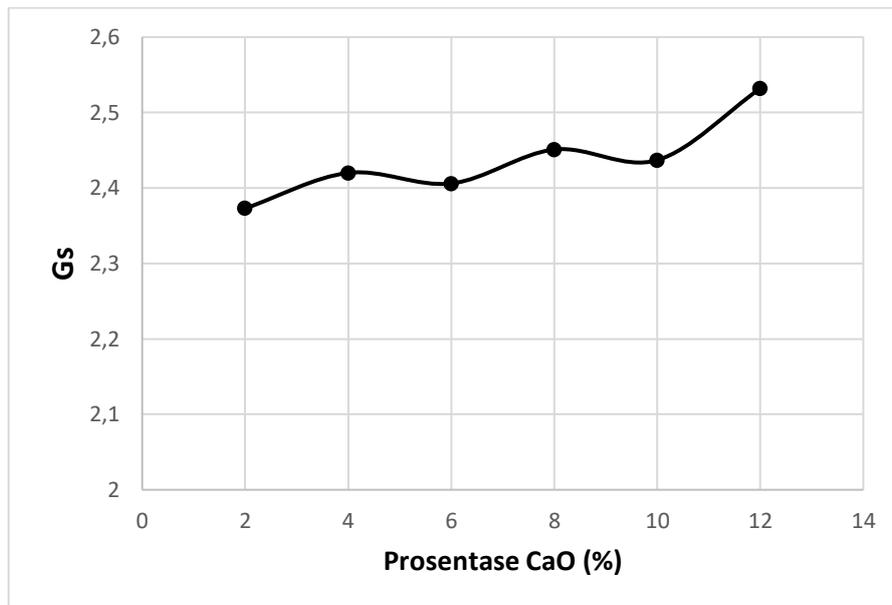


(c)

Gambar 2.15 Pengaruh prosentase kapur CaO terhadap: a) Liquid Limit, b) Plastic Limit, dan c) Plasticity Index (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)

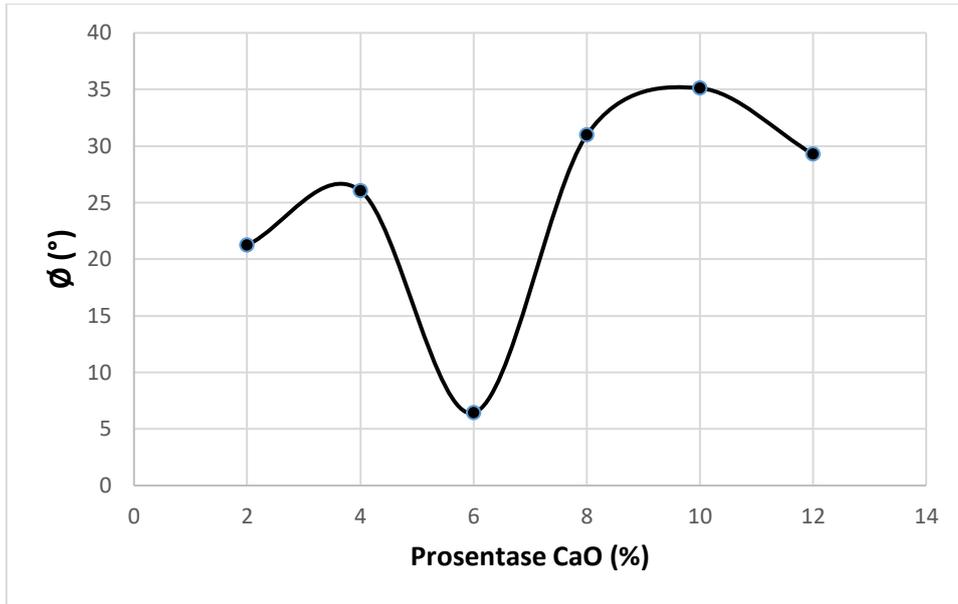
Harga Gs pada kondisi initial LuSi adalah 2,56. Setelah distabilisasi dengan kapur CaO harga Gs akan mengalami penurunan pada prosentase 2% (Gambar 2.16). Kemudian, mengalami penurunan dan kenaikan dengan bertambahnya prosentase kapur CaO. Hal ini dapat

dilihat bahwa nilai specific gravity tidak berubah secara signifikan terhadap prosentase bahan tambah stabilisasi kapur CaO.

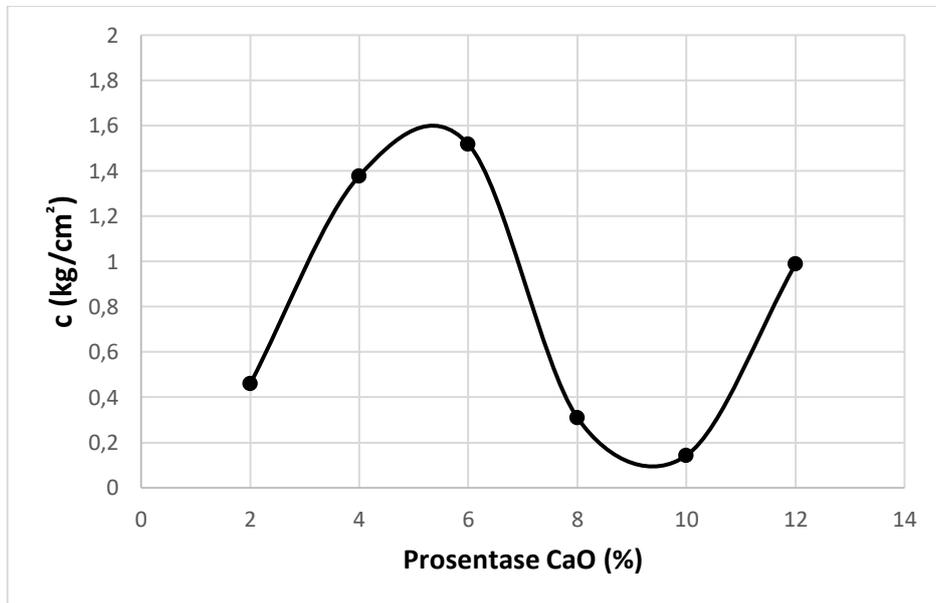


Gambar 2.16 Pengaruh prosentase CaO terhadap *Specific Gravity* (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)

Harga sudut geser dalam dan kohesi initial LuSi masing-masing adalah 22,83 dan 0,0627 kg/cm². Setelah distabilisasi dengan kapur CaO nilai sudut geser dalam mengalami penurunan pada penambahan prosentase kapur CaO 2% kemudian pada prosentase 4% nilai sudut geser dalam naik (Gamabar 2.17.a). Hal ini berarti pembentukan gel sudah maksimum pada prosentase kapur Ca(OH)₂ sebesar 4%. Sebagai akibatnya penambahan kapur CaO hanya berfungsi sebagai filler saja dan bukan untuk membentuk gel CaSiO₃. Perilaku sudut geser dalam ini berbanding terbalik dengan nilai kohesi, dimana nilai kohesi meningkat dengan bertambahnya prosentase kapur CaO yang ditambahkan pada prosentase 4% hingga 6% (Gambar 2.17.b). Jadi, berdasarkan penjelasan di atas maka prosentase kapur CaO yang optimum adalah sebesar 4%.



(a)



(b)

Gambar 2.17 Pengaruh prosentase CaO terhadap: a) sudut geser dalam, dan b) kohesi (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Langkah-Langkah Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara analisa data sekunder dan didukung data peneliti terdahulu dengan beberapa tahap kegiatan. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab permasalahan yang ada pada Sub Bab 1.2. Penentuan material bahan timbunan urugan tanggul dan prosentase campuran yang optimum dilakukan berbagai variasi campuran dengan prosentase bahan campuran yang berbeda-beda pula dari pengolahan data sekunder yang didukung data penelitian terdahulu, serta melihat stabilitas tanggul dari kelongsoran yang telah mengalami perubahan iklim (perubahan kadar air). Urutan pekerjaan diberikan dalam bentuk bagan alir seperti Gambar 3.1. dan secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut :

1. Proses tahapan awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang diperlukan untuk mengerjakan tesis. Data-data tersebut berupa data penunjang yaitu studi literatur dan studi penelitian sebelumnya serta data sekunder dari peneliti lainnya.
2. Tahap pemilihan komposisi untuk perencanaan material LuSi yang distabilisasi dengan kapur untuk mencari nilai optimum terbagi menjadi 2 yaitu :
 - a. LuSi dengan kapur hidup jenis CaO
Data Sekunder yang akan digunakan sebagai analisa dari peneliti Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo (PPLS,2018) ,dengan variasi prosentase 2% - 12%.
 - b. LuSi dengan kapur mati jenis Ca(OH)₂
Data Sekunder yang akan digunakan sebagai analisa dari Tesis Iis Faizah (2013), dengan variasi prosentase 5% - 15%.
Pada tahap tersebut dimaksudkan untuk mengetahui perbedaan dari jenis kapur serta karakteristik dari tanah tersebut yang sudah dilakukan stabilisasi.
3. Persyaratan timbunan biasa dilakukan sebagai penunjang keamanan tanggul yang akan diterapkan dan dimodelkan sesuai dengan yang disyaratkan. Persyaratan tersebut dapat dilihat pada Bab 2 Sub Bab 2.10.
4. Pemetaan data *Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)* dilakukan untuk mengetahui hasil pengeringan dan pembasahan akibat perubahan iklim yang mempengaruhi kadar air. Dengan, mengacu pada komposisi optimum dari lumpur yang ditambahkan dengan bahan stabilisator yaitu kapur. Dalam pemetaan tersebut dilakukan dengan melihat nilai dari segi

parameter fisik dan mekanik. Parameter fisik dan mekanik yang dapat dilihat sebagai berikut:

- *Specific Gravity*
- Kadar Air (*Water Content*)
- Atterberg Limit
- Analisa Saringan dan Hidrometer
- Klasifikasi Tanah
- Proctor Standar
- Triaksial

Dari segi parameter fisik dan mekanik, juga dilihat untuk grafik SWCC yang dimana grafik SWCC digunakan untuk parameter data ke analisa pemodelan dengan program geoteknik yaitu memasukkan nilai *Matric Suction* dan *Volumetric Water Content*.

5. Tahap pemodelan tanggul ini data yang dibutuhkan adalah hasil dari campuran optimum LuSi yang distabilisasi dengan kapur untuk bahan timbunan tanggul, kemudian data tanah dasar bawah tanggul diperoleh dari Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo yaitu Data BorLog DB-01 yang dapat dilihat pada Lampiran 5.
6. Data tanah yang diperoleh dari Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kementrian PUPR yaitu data Bor Log dan Sondir, hanya saja yang digunakan dalam Tesis ini yaitu data tanah Bor Log. Ada beberapa parameter yang belum ditentukan nilai korelasi sesuai data NSPT maka dari itu dicari nilai korelasi untuk mengetahui nilai yang belum ditentukan sebagai penunjang input data tanah pada pemodelan *Geostudio (SEEP/W* dan *SLOPE/W)* dan *PLAXIS 2D* yaitu sebagai berikut :

- **Korelasi N-SPT terhadap nilai konsistensi suatu tanah**

Nilai SPT dapat digunakan untuk menghitung sifat *friction angle* (ϕ), *relative density* (D_r), kapasitas dukung dan penurunan, kecepatan gelombang geser (v_s) tanah, maupun potensi likuifaksi. Di sisi lain, uji SPT yang sebenarnya dikembangkan untuk tanah berbutir kasar telah diaplikasikan untuk pada tanah berbutir halus, untuk memperkirakan *undrained compressive strength* (q_u), *undrained shear strength* (S_u) dan koefisien kompresibilitas volume (m_v). Perkiraan nilai-nilai tersebut seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Korelasi NSPT

Uraian	Tanah Tidak Kohesif				
	N	0-10	11-30	31-50	>50
Berat isi, kN/m ³	12-16	14-18	16-20	18-23	
Sudut geser, ϕ	25-35	28-36	30-40	>35	
Keadaan	Lepas	Sedang	Padat	Sangat Padat	
	Tanah Kohesif				
N	<4	4-6	6-15	16-25	>25
Berat isi, kN/m ³	14-18	16-18	16-18	16-18	>20
qu, kPa	<25	20-50	30-60	40-200	>100
Konsistensi	Sangat lunak	Lunak	Sedang	Kenyal (<i>Stiff</i>)	Keras

Sumber: Bowles & Hainim, 2004

- **Korelasi N-SPT terhadap nilai C_u**

Korelasi nilai C_u dengan N-SPT dan sondir untuk tanah dominan lanau dan lempung menurut Mochtar, 2006 seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Konsistensi Tanah Untuk Tanah Dominan Lanau dan Lempung

Konsistensi tanah	Taksiran kekuatan geser undraines, C_u		Taksiran harga SPT, harga N
	kPa	ton/m ²	
Sangat lunak (very soft)	0-12.5	0-1.25	0-2.5
Lunak (soft)	12.5-25	1.25-2.5	2.5-5
Menengah (medium)	25-50	2.5-5.0	5-10
Kaku (stiff)	50-100	5.0-10	10-20
Sangat kaku (very stiff)	100-200	10-20	20-40
Keras (hard)	>200	>20	>40

Sumber : Braja M.Das, 1985 Mekanika Tanah

- **Korelasi N-SPT terhadap nilai ϕ**

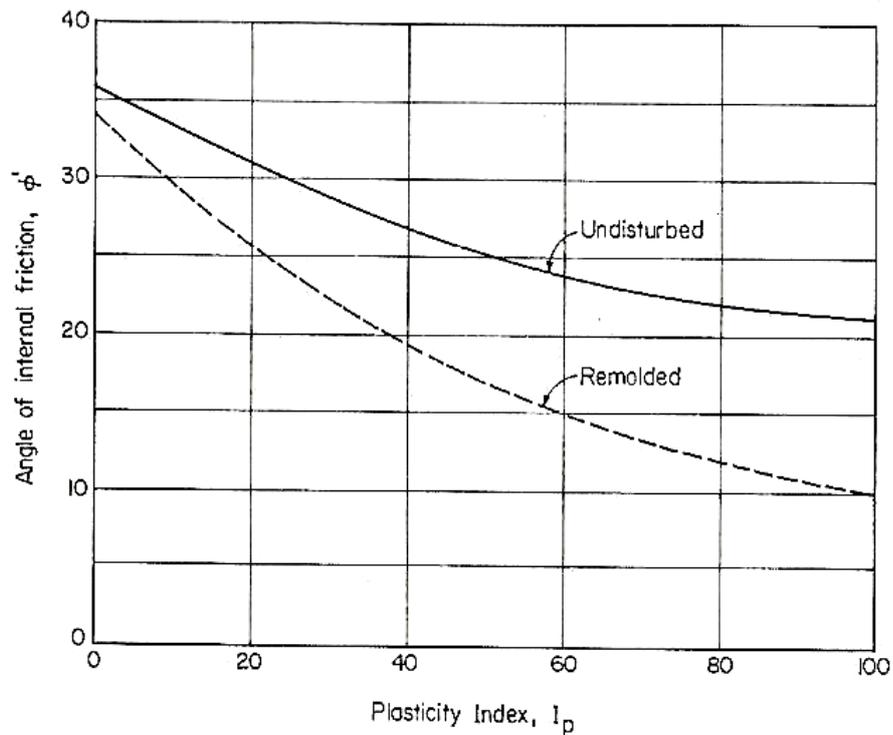
Korelasi nilai ϕ dengan N-SPT menurut Braja M.Das, 1985 seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Pedoman Memprakirakan Harga ϕ Dari Harga N-SPT

Kondisi kepadatan	Kepadatan relatif, R_d (%)	Perkiraan Harga N_{SPT}	Perkiraan harga, ϕ (°)	Perkiraan berat volume jenuh, γ_{sat} (ton/m³)
Very loose (sangat renggang)	0 s/d 15	0 s/d 4	0 s/d 28	< 1.60
Loose (renggang)	15 s/d 35	4 s/d 10	28 s/d 30	1.50 – 2.0
Medium (menengah)	35 s/d 65	10 s/d 30	30 s/d 36	1.75 – 2.10
Dense (rapat)	65 s/d 85	30 s/d 50	36 s/d 41	1.75 – 2.25
Very dense (sangat rapat)	85 s/d 100	>50	41*	

Sumber : Braja M.Das, 1985 Mekanika Tanah

- **Korelasi IP terhadap nilai ϕ**



Gambar 3.1 Pedoman Memprakirakan Harga ϕ Dari Harga IP

Sumber : Bowles, 1997

- **Korelasi N-SPT terhadap nilai modulus elastisitas tanah**

Nilai modulus young menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari *Triaxial Test*. Nilai Modulus elastisitas (E_s) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dan data sondir seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Jenis Tanah	E_s (Kg/cm ²)
Lempung	
Sangat lunak	3 – 30
Lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Keras	70 – 200
Berpasir	300 – 425

Jenis Tanah	Es (Kg/cm²)
Pasir	
Berlanau	50 – 200
Tidak padat	100 – 250
Padat	500 – 1000
Pasir dan Kerikil	
Padat	800 – 2000
Tidak padat	500 – 1400
Lanau	20 – 200
Loses	150 – 600
Cadas	1400 – 14000

Sumber : Bowles, 1997

- **Korelasi N-SPT terhadap nilai overconsolidated ratio, OCR**

Tabel 3.5 di bawah ini merupakan *Poisson's Ratio* untuk beberapa material:

Tabel 3.5 Poisson's Ratio

Material	Poisson's ratio ν
Lempung jenuh	0.4 – 0.5
Lempung tak jenuh	0.1 – 0.3
Lempung berpasir	0.2 – 0.3
Lanau	0.3 – 0.35
Pasir padat	0.1 – 1.00
Pasir berkerikil	0.3 – 0.4
Batuan (Rock)	0.1 – 0.4 (agak bergantung jenis batuan)
Tanah lus	0.1 – 0.3
Es	0.36
Beton	0.15 – 0.25

Sumber: Bowles, 1988

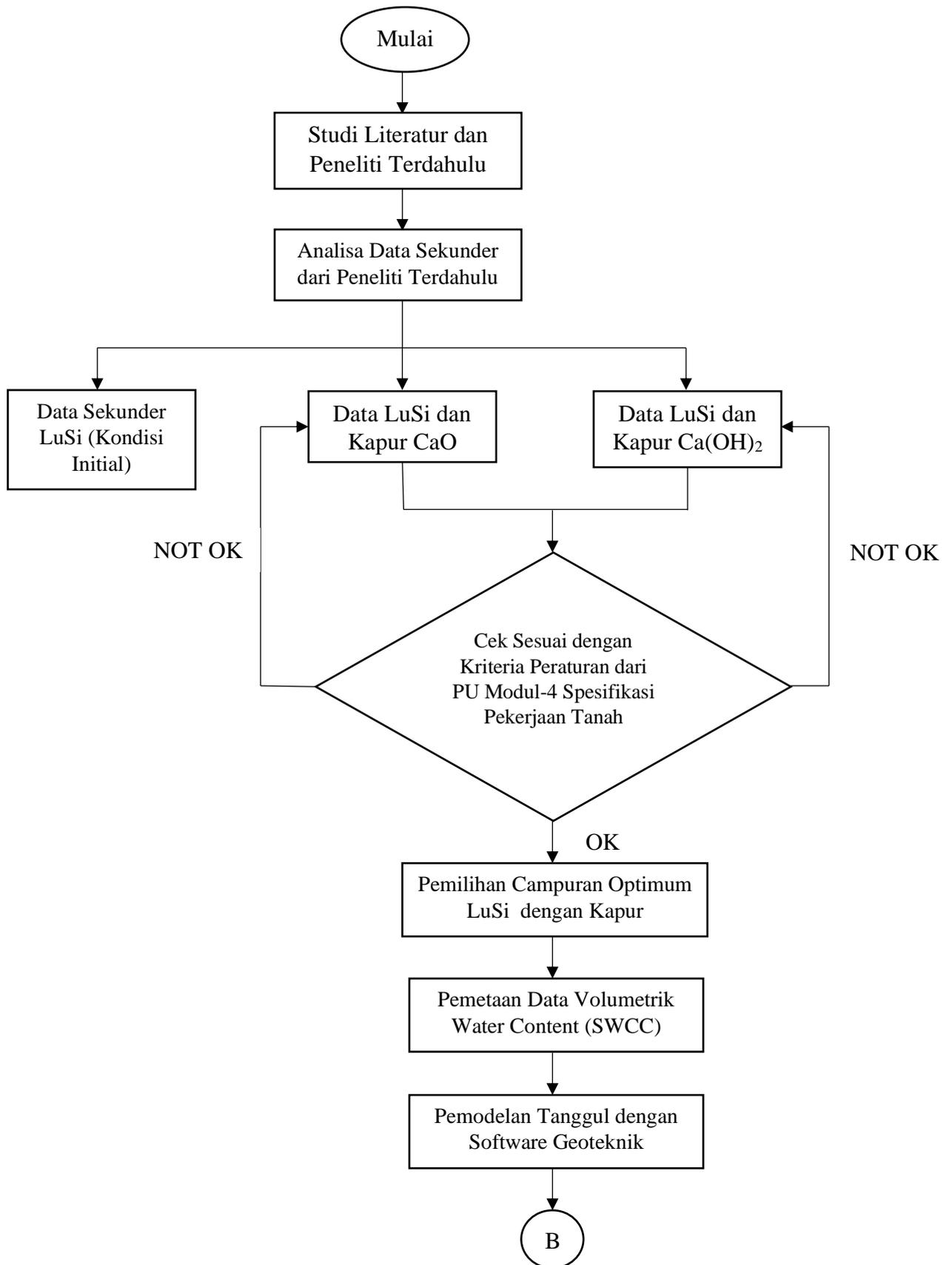
- **Korelasi Permeabilitas (k)**

Permeabilitas adalah kecepatan masuknya air pada tanah dalam keadaan jenuh. Penetapan *permeabilitas* dalam tanah baik vertical maupun horizontal sangat penting peranannya dalam pengelolaan tanah dan air. Nilai koefisien *permeabilitas* tanah dapat ditentukan berdasarkan jenis tanah tersebut seperti pada Tabel 3.6 :

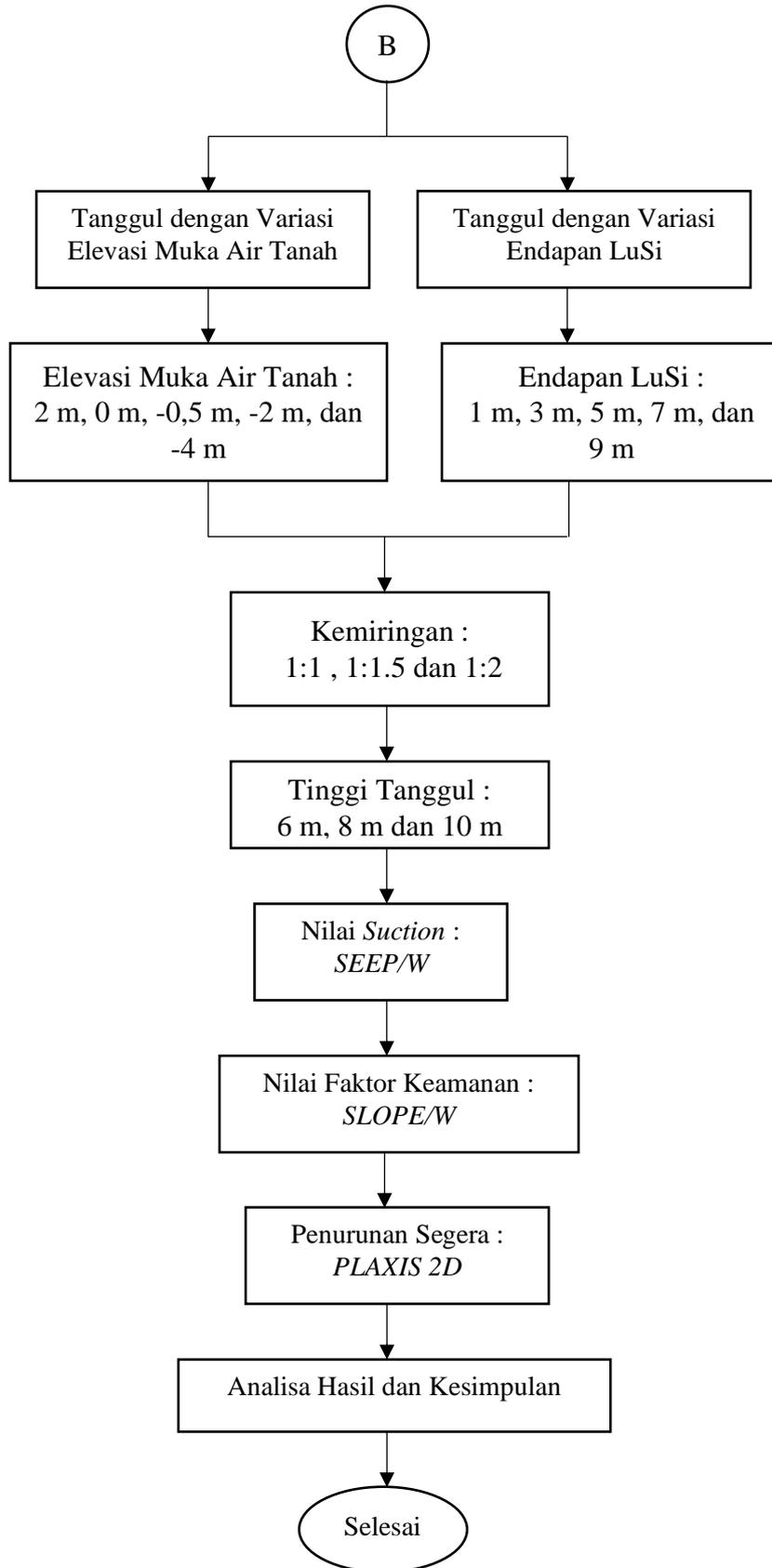
Tabel 3.6 Nilai koefisien Permeabilitas tanah

Jenis Tanah	k	
	cm/dtk	ft/mnt
Kerikil bersih	1.0-100	2.0-200
Pasir kasar	1.0-0.01	2.0-0.02
Pasir halus	0.01-0.001	0.02-0.002
Lanau	0.001-0.00001	0.002-0.00002
Lempung	<0.000001	<0.00002

Sumber : Braja Das, 1995



Gambar 3.2 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.3 Bagan Alir Penelitian (Lanjutan)

7. Analisis hasil ini dilakukan dengan cara melakukan pemetaan data dari peneliti terdahulu serta data sekunder sebagai dasar atau gambaran dari pemodelan tanggul yang aman melalui proses pengeringan dan pembasahan (perubahan iklim) yang bahan timbunannya menggunakan lumpur yang distabilisasi dengan kapur.
 - a. Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum
 - b. Penentuan Data Matric Suction berdasarkan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
 - c. Validasi Parameter *Matric Suction* Hasil Pemodelan SEEP/W terhadap Model SWCC
 - d. Stabilitas Tanggul dan Penurunan
 - Program *GeoStudio* (*SEEP/W* dan *SLOPE/W*)

Analisa model untuk stabilitas tanggul terkait 4 variasi pemodelan dengan mengacu pada ketinggian (6 m, 8 m. dan 10 m), kemiringan tanggul (1:1, 1:1,5 dan 1:2), elevasi muka air tanah (2 m, 0 m, -0,5 m, -2 m, dan -4 m) dan tinggi endapan LuSi (1 m, 3 m, 5 m, 7 m dan 9 m).. Hasil yang diperoleh dari program *GeoStudio* adalah nilai faktor keamanan (SF) pada setiap kondisi yang menunjukkan kestabilan lereng tanggul dengan adanya penerapan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
 - Program *PLAXIS 2D*

Analisa penurunan segera (*Immediate Settlement*) pada tanggul dengan variasi geometri (ketinggian dan kemiringan tanggul).

BAB IV

ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dibahas mengenai analisa hasil dari data sekunder dengan sumber peneliti yang berbeda. Analisa hasil data sekunder tersebut dimaksudkan untuk dapat digunakan sebagai dasar atau acuan dalam penelitian untuk mengetahui penerapan *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) pada stabilitas tanggul karena perubahan iklim yang mempengaruhi kadar air pada tanah.

4.1 Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum

Hasil analisa data sekunder pada Bab II Sub Bab 2.13 di atas maka dapat disimpulkan bahwa prosentase optimum dengan bahan stabilisasi kapur terbagi menjadi 2 (dua) macam yaitu adalah 4% CaO dari penelitian Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR (2018) dan 10% Ca(OH)₂ dengan umur stabilisasi 20 hari (Iis Faizah, 2013). Kedua data tersebut sudah memenuhi persyaratan timbunan biasa menurut Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Modul-4 Spesifikasi Pekerjaan Tanah 2016 yang dapat dilihat pada Bab II Sub Bab 2.9. Prosentase optimum LuSi yang distabilisasi dibedakan dari klasifikasi tanah bahwa LuSi yang distabilisasi dengan CaO merupakan plastisitas tinggi karena masuk kedalam kelompok A-7-5 sesuai AASTHO, sedangkan untuk LuSi yang distabilisasi dengan Ca(OH)₂ tergolong plastisitas rendah masuk kedalam A-5 sesuai AASTHO. Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa bahan stabilisasi yang dapat memberikan peningkatan parameter fisik dan mekanik yang paling optimum apabila dicampurkan dengan LuSi adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Perbandingan Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum

Jenis Pengujian	Jenis Tanah		Satuan
	A	B	
a. Analisa Pembagian Butir			
- Fraksi Kerikil (<i>gravel</i>)	0	0	%
- Fraksi Pasir (<i>sand</i>)	0,67	6,14	%
- Fraksi Lanau - Lempung (<i>silt - clay</i>)	99,33	93,86	%

Jenis Pengujian	Jenis Tanah		Satuan
	A	B	
b. Volumetri dan Gravimetri			
- Spesifik Gravity, G _s	2,68	2,42	-
- Berat Volume Tanah, γ _t	-	1,789	gr/cm ³
- Berat Volume Kering, γ _d	1,386	1,374	gr/cm ³
- Kadar Air Optimum, W _{c_{opt}}	17,501	29,7	%
c. Konsistensi			
- Liquid Limit (LL)	49,52	65,67	-
- Plastic Limit (PL)	40,137	39,255	%
- Plasticity Index (PI)	9,386	26,415	%
d. Klasifikasi Tanah			
- USCS (<i>Unified Soil Classification System</i>)	OL/ML	OH/ML	-
- AASHTO (<i>American Association of State Highway and Transportation Officials Classification</i>)	A-5	A-7-5	-
e. Triaksial			
- Ø	66,34	26,053	°
- c	0,047	1,378	kg/cm ²
f. Daya Dukung			
- Kuat Tekan (<i>Unconfined Compression Test</i>)	1,44	-	kg/cm ²

Sumber : Data Sekunder

Keterangan :

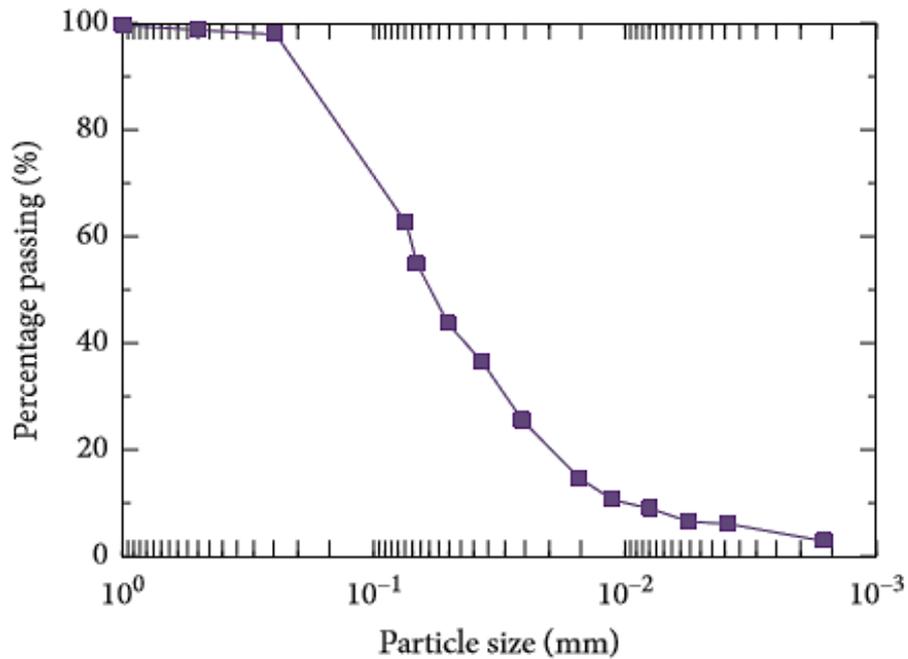
A = Lumpur Sidoarjo 90% + Kapur Ca(OH)₂ 10%, 20 hari (Iis Faizah, 2013)

B = Lumpur Sidoarjo 96% + Kapur CaO 4% (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018)

4.2 Penentuan Data *Matric Suction* berdasarkan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)

Pemilihan prosentase optimum campuran yang distabilisasi dengan kapur, dilanjutkan tahap pendekatan data sekunder terhadap nilai dari *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). Hal tersebut dilakukan karena tidak semua data sekunder prosentase optimum campuran yang distabilisasi dengan kapur melewati proses pembasahan dan pengeringan (perubahan iklim) terdapat *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). Maka dari itu, melakukan pendekatan data sekunder dilakukan dengan melihat nilai parameter fisik dan mekanik yang mendekati data sekunder atau data peneliti terdahulu yang sudah ditentukan dan dipilih prosentase optimum campuran yang distabilisasi dengan kapur. Dari hasil pendekatan data sekunder yang terpilih dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tanah Dasar Jalan Tol Semarang-Solo Section II di Km 18 merupakan tanah yang berklasifikasi tanah dengan plastisitas tinggi menurut AASHTO yaitu A-7-5 (Herlinawati, 2018) yang dimana dominan fraksi lanau-lempung sebesar 84,24%. Pada Tabel 4.2 untuk Yudong Silt (Junran Zhang, dkk, 2018) merupakan tanah yang berklasifikasi plastisitas rendah (A-4) merupakan tanah lanau-lempung (*silt-clay minerals*) menurut AASTHO yang dimana tanah tersebut merupakan tanah lanau kepasiran. Kelompok ini tanah berbutir yang lebih dari 35% butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200 yang bisa dilihat pada Gambar 4.1. Pemetaan data sekunder terhadap *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) dengan melihat nilai parameter fisik dan mekanik yang mendekati data sekunder yang sudah ditentukan atau dipilih, sesuai dengan data sekunder LuSi yang distabilisasi dengan Kapur dengan nilai prosentase yang paling optimum, yang sudah dijelaskan diatas pada Sub Bab 4.1.



Gambar 4.1 Analisis ayakan *Yodung Silt* (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018)

Tabel 4.2 Data Pemetaan Parameter Fisik dan Klasifikasi Tanah terhadap *Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)*

Jenis Pengujian	Jenis Tanah		Satuan
	C	D	
a. Analisa Pembagian Butir			
- Fraksi Kerikil (gravel)	0,61	-	%
- Fraksi Pasir (sand)	15,15	-	%
- Fraksi Lanau - Lempung (silt - clay)	84,24	-	%
b. Volumetri dan Gravimetri			
- Spesifik Gravity, G _s	2,62	2,72	-
- Berat Volume Tanah, γ _t	1,65	-	gr/cm ³
- Berat Volume Kering, γ _d	1,21	1,72	gr/cm ³
- Kadar Air Optimum, W _{c_{opt}}	-	12,7	%
c. Konsistensi			
- Liquit Limit (LL)	75,67	24,5	-
- Plastic Limit (PL)	30,03	17,3	%
- Plasticity Index (PI)	26,57	7,2	%

Jenis Pengujian	Jenis Tanah		Satuan
	C	D	
d. Klasifikasi Tanah			
- USCS (Unified Soil Classification System)	OH/MH	CL/ML	-
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials Classification)	A-7-5	A-4	-

Sumber : Data Sekunder

Keterangan :

C = Tanah Dasar Jalan Tol Semarang-Solo Section II di Km 18 (Herlinawati, 2018)

D = Yodung Silt (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018)

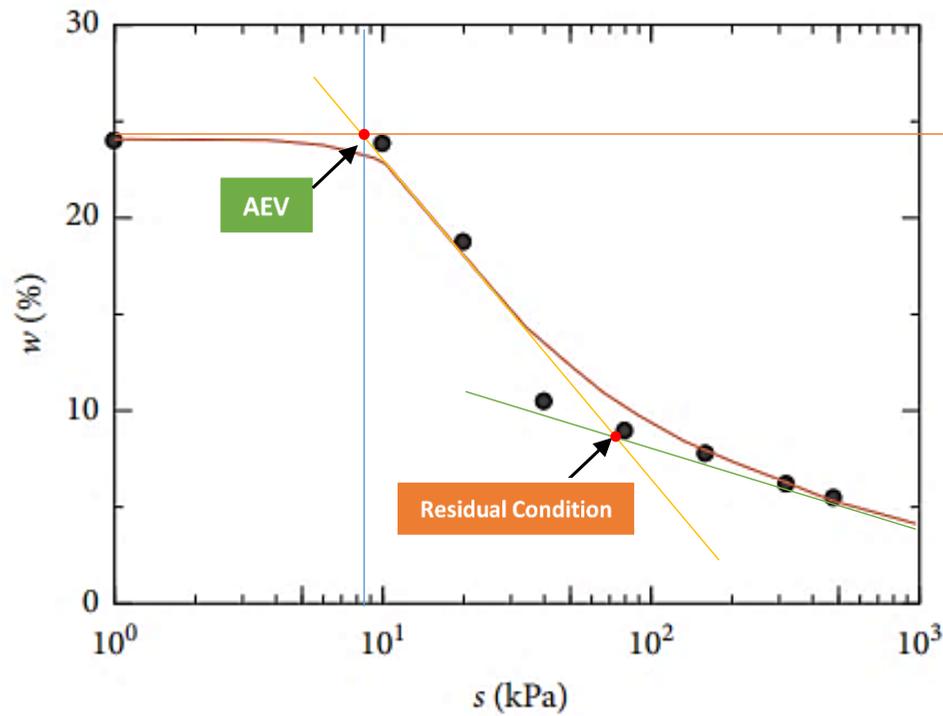
Pada Gambar 4.2 merupakan tanah Yudong Silt yang tergolong plastisitas rendah, hubungan antara matric suction dan derajat kejenuhan atau kadar air digambarkan dalam persamaan Van Genuchten. Berdasarkan penelitian Indarto dkk, (2010) titik-titik baik pengeringan dan pembasahan yang memiliki derajat kejenuhan 100% akan terletak pada garis lurus yang terdapat pada Gambar 4.2. Pada poin pertama adalah bila titik dimana garis lurus tersebut mulai berubah menjadi garis lengkung, adanya pori yang sangat besar mulai membuat tanah menjadi tidak jenuh yang biasa disebut “*Air Entry Value*” (AEV).

Berdasarkan grafik yang terlihat pada Gambar 4.2, lekukan garis mulai terjadi pada kadar air (wc) sekitar 23,9%. Jika dihubungkan dengan grafik lainnya akan setara dengan derajat kejenuhan (Sr) 83%, suction (-Uw) 8,5 kPa. Kemudian, poin kedua adalah “*Residual Condition*” dimana pada poin ini menghilangnya air pada tanah akan menjadi lebih sulit, yang berada pada nilai suction yang tinggi yakni hingga 1000 kPa. Nilai *Residual Condition* sebesar 6,5% yang dapat dilihat pada Gambar 4.2. Semua grafik SWCC akan memberikan karakteristik yang sama seperti yang dijelaskan diatas. Pada Tabel 4.3 merupakan nilai *Matric Suction* pada berbagai kadar air (w) dapat digambarkan dalam sautu kurva yang dinamakan *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC).

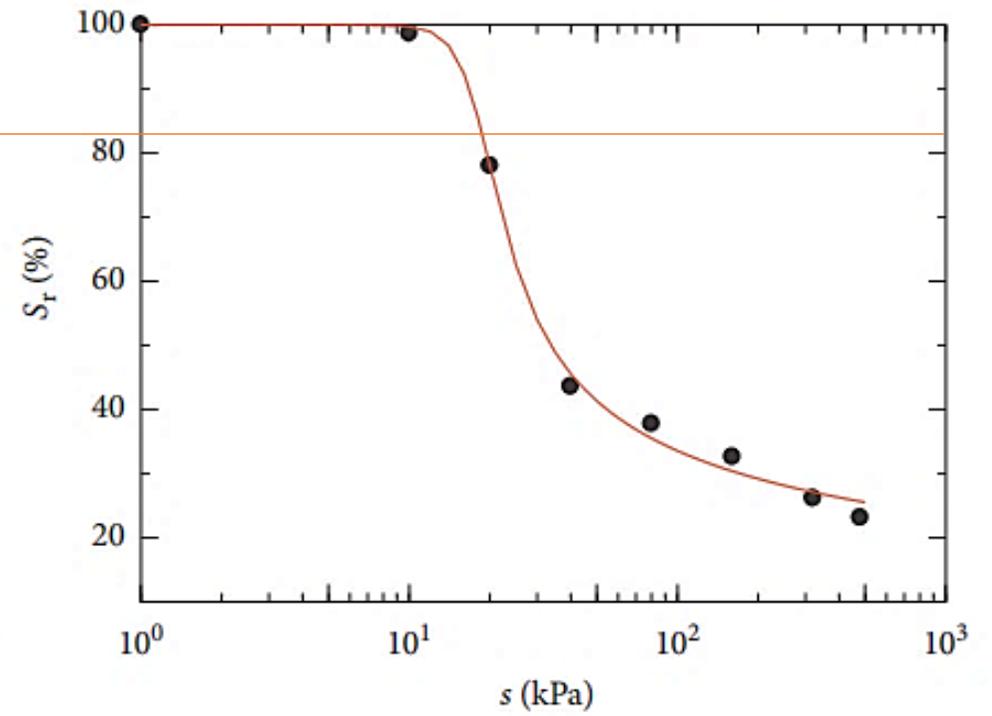
Tabel 4.3 Nilai SWCC Yudong Silt

Yudong Silt		
Wc (%)	VWC	Matric Suction (kPa)
6,9	0,239	1
10,4	0,211379	10
12,3	0,148594	20
15,8	0,099965	40
18,2	0,06576	80
20,5	0,038791	160
22,1	0,024854	320
23,9	0,01402	480

Sumber : Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018



Drying process
 ● Measured points
 — Fitting curve



Drying process
 ● Test data for drying
 — Fitting curve

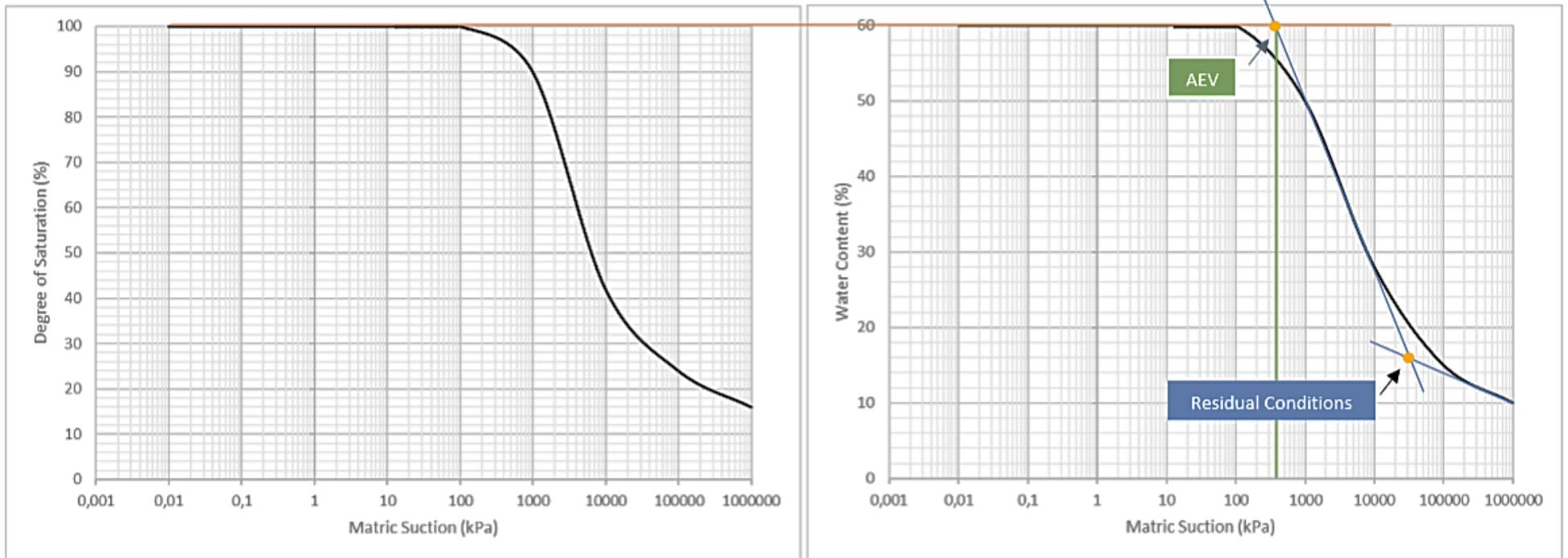
Gambar 4.2 Nilai SWCC *Yudong Silt* (Junran Zhang ,¹ Tong Jiang ,¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018)

Pada Gambar 4.3 merupakan SWCC dengan tanah yang tergolong dalam klasifikasi USCS yaitu MH (*clay high plasticity*) hubungan antara matric suction dan derajat kejenuhan atau kadar air digambarkan dalam beberapa persamaan Van Genuchten. Pada poin pertama adalah bila titik dimana garis lurus tersebut mulai berubah menjadi garis lengkung, adanya pori yang sangat besar mulai membuat tanah menjadi tidak jenuh yang biasa disebut “*Air Entry Value*” (AEV). Berdasarkan grafik yang terlihat pada Gambar 4.3, lekukan garis mulai terjadi pada kadar air (wc) sekitar 61,83%. Jika dihubungkan dengan grafik lainnya akan setara dengan derajat kejenuhan (Sr) 100%, suction (-Uw) 400 kPa. Kemudian, poin kedua adalah “*Residual Condition*” dimana pada poin ini menghilangnya air pada tanah akan menjadi lebih sulit, yang berada pada nilai suction yang tinggi yakni hingga 1000000 kPa. Nilai *Residual Condition* sebesar 15% yang dapat dilihat pada Gambar 4.3. Semua grafik SWCC akan memberikan karakteristik yang sama seperti yang dijelaskan diatas. Pada Tabel 4.4 merupakan nilai *Matric Suction* pada berbagai kadar air (wc) dapat digambarkan dalam sautu kurva yang dinamakan *Soil Water Characterictic Curve* (SWCC).

Tabel 4.4 Nilai *Matric Suction* pada SWCC dengan Tanah MH

MH (<i>experimental</i>)				
Sr (%)	Wc (%)	GWC	VWC	Matric Suction (kPa)
24,48	15,14	0,1514	0,15136	170141
25,76	15,93	0,1533	0,159274	49911,4
56,61	34,94	0,3494	0,35002	5307,62
61,66	38,13	0,3813	0,381244	2091,7
100	61,83	0,6183	0,6183	560,53

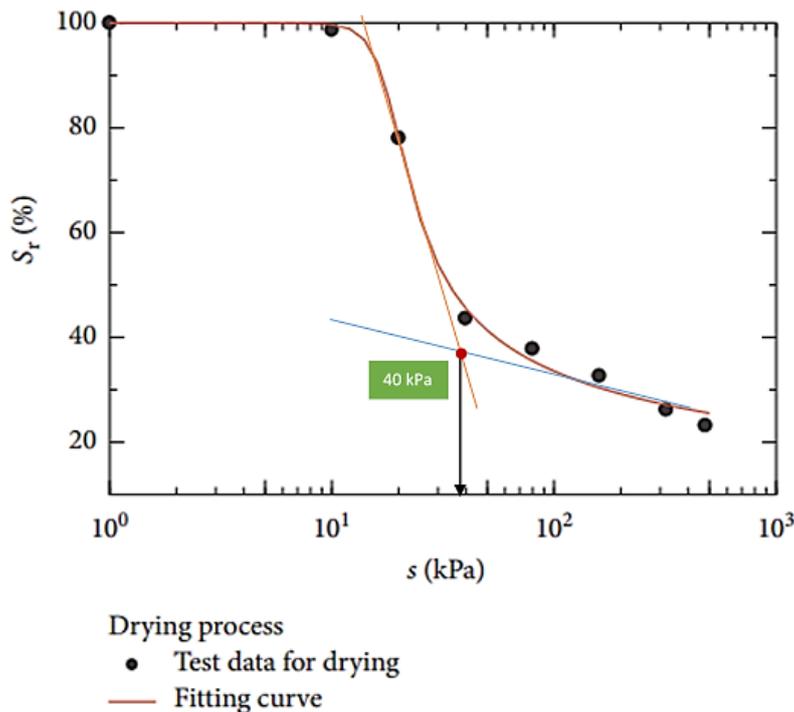
Sumber : Herlinawati, 2018



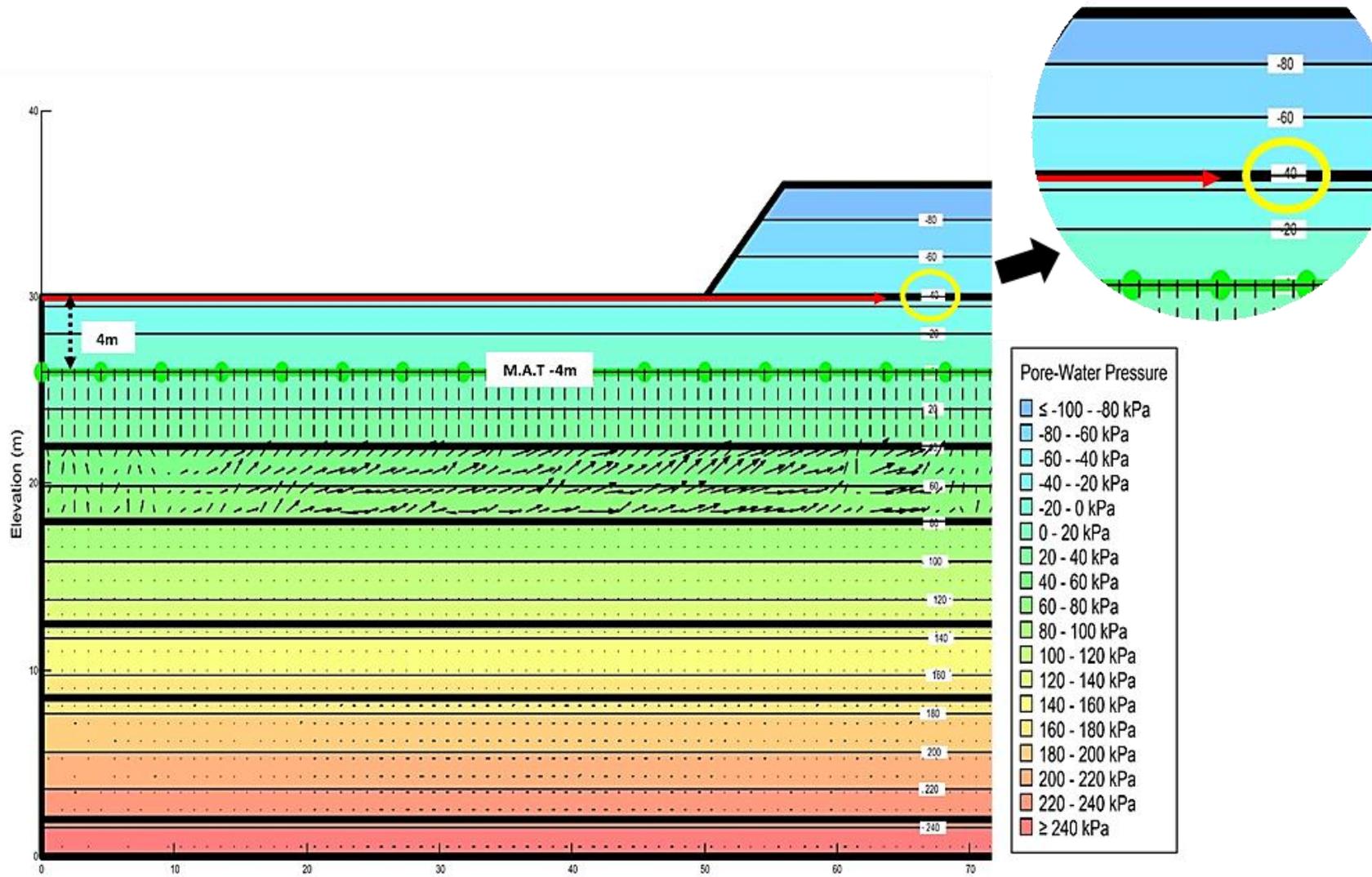
Gambar 4.3 Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) tanah MH (Herlinawati, 2018)

4.3 Validasi Parameter *Matric Suction* Hasil Pemodelan *SEEP/W* terhadap Model *SWCC*

Validasi kebenaran model *SWCC* sesuai dengan hasil pemodelan *SEEP/W* bertujuan untuk mengetahui proses pemodelan sudah berjalan dengan baik serta untuk mengetahui posisi nilai *suction* yang sesuai dengan kurva *SWCC* yang nantinya jika sudah sesuai dengan kebenaran model dari *SWCC* akan dilanjutkan ke tahap perhitungan *SLOPE/W*. Dilihat pada Gambar 4.4 data *SWCC* dari *Yudong Silt* (Plastisitas Rendah) terdapat nilai *suction* 40 kPa atau 0,4 kg/cm² bila akan dinyatakan dalam tinggi kapiler, maka nilai hisapan pF dapat dikalibrasikan ke dalam cm. Nilai *suction* 40 kPa dikonversikan ke satuan tekanan menjadi 0,4 bar, kemudian akan dikonversikan kedalam satuan tinggi dengan hasil 4 m. Hasil posisi nilai *suction* 4 m terdapat di posisi atas elevasi muka air tanah yang dapat dilihat pada Gambar 4.5. Hasil validasi tersebut sesuai yang artinya kebenaran model *Soil-Water Characteristic Curve* (*SWCC*) sudah terverifikasi dengan hasil pemodelan *SEEP/W* yang dilihat pada nilai *pore-water pressure*. Hasil validasi pada Gambar 4.5. dapat dilanjutkan ke tahap perhitungan stabilitas tanggul yaitu *SLOPE/W* jika sudah tervalidasi dengan benar.



Gambar 4.4 *SWCC* untuk validasi posisi nilai *matric suction* (Junran Zhang ,¹ Tong Jiang ,¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018)



Gambar 4.5 Validasi hasil perhitungan SEEP/W sesuai dengan SWCC

Sumber : Data Primer

4.4 Stabilitas Tanggul LuSi dengan Memperhatikan Parameter *Matric Suction*

Pada pemodelan stabilitas tanggul material LuSi yang distabilisasi kapur dengan memperhatikan parameter *matric suction*, pada tahapan awal yaitu *SEEP/W*, diperlukan parameter tanah dasar seperti pada Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 yang dimana untuk lapisan tanah menggunakan material model *Saturated Only* dengan nilai *Saturated X-Conductivity* yang berbeda berdasarkan jenis dari lapisan tanah dengan melihat korelasi nilai koefisien permeabilitas tanah dari Braja Das, 1995 yang terdapat pada Bab III Sub.Bab 3.1. Pada data hasil tanah dasar Boring Log DB-01 yang dapat dilihat lengkap pada Lampiran 5.

Tabel 4.5 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada *SEEP/W*

Parameter	Satuan	Lempung dan Lanau	Pasir	Lempung dan Lanau
Basic				
Kedalaman	m	0-2	2-8,5	8,5-12,5
Tebal	m	2	6,5	4
Material Model	-	Saturated Only	Saturated Only	Saturated Only
Saturated X-Conductivity	m/sec	1,00E-08	0,0001	1,00E-08
Ky'Ratio		1	1	1
Kx' Ratio		1	1	1
Rotation	°	0	0	0
Sat. Vol Water Content	m ³ /m ³	0	0	0
Mv	kPa	0	0	0

Tabel 4.6 Parameter Tanah Dasar DB-01 (lanjutan)

Parameter	Lempung dan Lanau	Lanau dan Pasiran	Lanau dan Pasiran
Basic			
Kedalaman	12,5-18	18-22	22-30
Tebal	5,5	4	8
Material Model	Saturated Only	Saturated Only	Saturated Only
Saturated X-Conductivity	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-05
Ky'Ratio	1	1	1
Kx' Ratio	1	1	1
Rotation	0	0	0
Sat. Vol Water Content	0	0	0
Mv	0	0	0

Pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 merupakan data dari *volumetric water content* dan *hydraulic conductivity function* yang akan diinputkan kedalam tanah timbunan. Kemudian, untuk memasukkan nilai *suction* dalam pemodelan *SEEP/W* dengan data *matric suction* pada Sub Bab 4.2; Tabel 4.3 yaitu data material LuSi yang distabilisasi kapur dengan melakukan pendekatan data sekunder *Yudong Silt*, yang dimana data tersebut sama-sama mempunyai klasifikasi tanah berplastisitas rendah untuk tanah timbunan tanggul. Penggunaan data *matric suction* dengan tanah yang berplastisitas rendah ini dilakukan sebagai parameter pemodelan untuk stabilitas tanggul yang telah melewati tahap validasi kebenaran model *SWCC* sesuai dengan hasil pemodelan *SEEP/W* dan dapat dimodelkan untuk jenis timbunan tanggul biasa.

Tabel 4.7 Estimate Volumetric Water Content

Jenis Tanah		Yudong Silt
Sat. Vol Water Content	m ³ /m ³	0,239
Sample Material	-	Silt
Min. Suction	-	1
Max. Suction	-	480

Jenis Tanah		Yudong Silt
Saturated X-Conductivity	m/sec	1,00E-07
Mv	kPa	0
Ky'Ratio		1
Kx' Ratio		1
Rotation	°	0

Tabel 4.8 Estimate Hydraulic Conductivity Function

Jenis Tanah		Yudong Silt
Estimation Method	-	Van Genuchten
Vol. Water Content Fn	m ³ /m ³	Silt W/C Function
Saturated Kx	m/sec	1,00E-07
Residual Water Content	m ³ /m ³	0,065
Min. Suction	-	1
Max. Suction	-	480

Setelah memasukkan nilai parameter untuk tanah dasar dan timbunan tanggul yang dibutuhkan, kemudian didalam pemodelan tersebut divariasikan elevasi muka air tanah yaitu diatas tanah dasar, bawah kaki tanggul, dan bawah tanah dasar dan memvariasikan tinggi endapan LuSi. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perbedaan hasil yang nantinya bisa diaplikasikan dalam kondisi tanggul untuk sungai, jalan, atau lainnya. Proses pemodelan ini akan dituliskan secara detail mengenai cara menjalankan *SEEP/W* dengan *software* geoteknik (*GeoStudio*) yang dapat dilihat pada Lampiran 2.

Pada pemodelan stabilitas tanggul dengan tahapan awal yaitu analisis *SEEP/W* terlebih dahulu dengan memasukkan nilai *Soil-Water Charateristic Curve* (SWCC) dan dilanjutkan tahapan kedua yaitu menghitung keamanan tanggul dengan *SLOPE/W*, diperlukan parameter tanah dasar seperti pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 yang dimana untuk lapisan tanah menggunakan material model *Mohr-Coulomb* dengan nilai γ , c dan ϕ yang berbeda berdasarkan jenis dari lapisan tanah dengan melihat korelasi yang terdapat pada Bab III Sub.Bab 3.1.

Tabel 4.9 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada *SLOPE/W*

Parameter	Satuan	Lempung dan Lanau	Pasir	Lempung dan Lanau
Kedalaman	m	0-2	2-8,5	8,5-12,5
Basic				
Unit Weight	kN/m ³	15,1	17	14,2
Cohesion	kPa	8,825985	9,80665	6,864655
Phi	°	28	8	5
Material Model	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb

Tabel 4.10 Parameter Tanah Dasar DB-01 pada *SLOPE/W* (lanjutan)

Parameter	Satuan	Lempung dan Lanau	Pasir	Lempung dan Lanau
Kedalaman	m	12,5-18	18-22	22-30
Basic				
Unit Weight	kN/m ³	13,4	14,2	18
Cohesion	kPa	9,80665	9,80665	19,6133
Phi	°	8	26	36
Material Model	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb

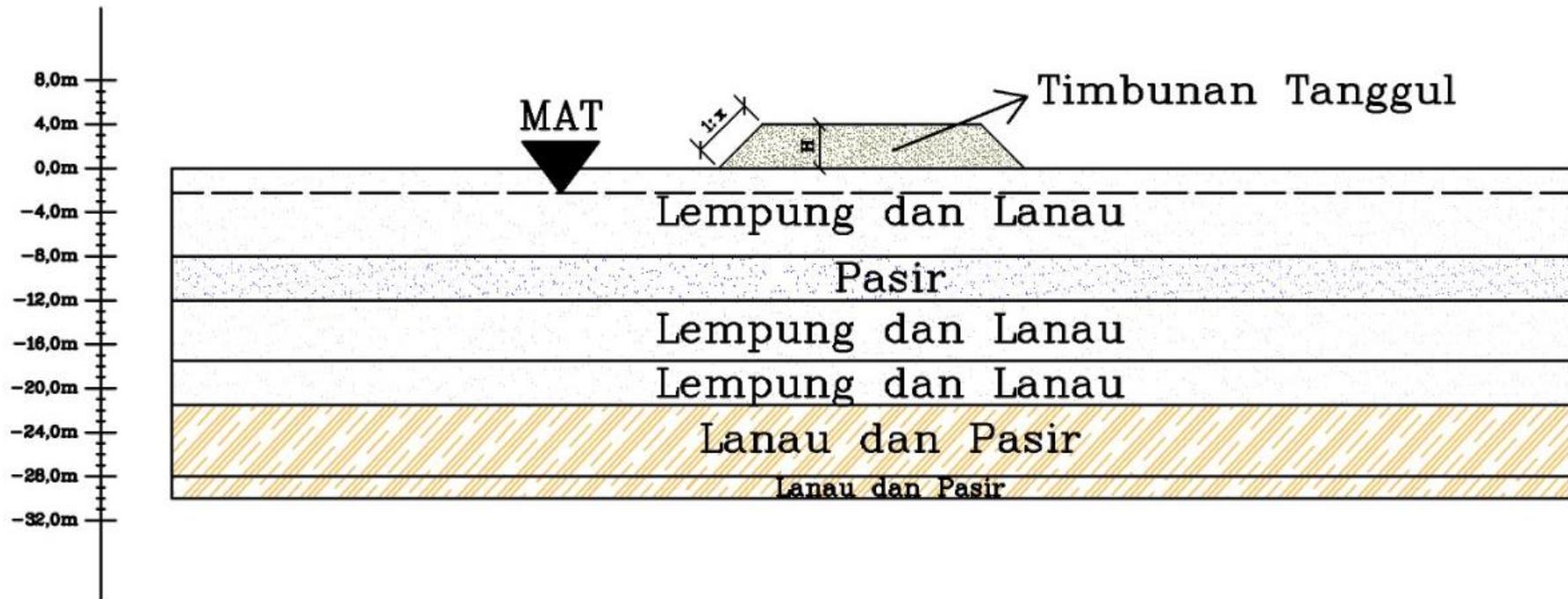
Tabel 4.11 Parameter Timbunan pada *SLOPE/W*

Parameter	Satuan	Tanggul
Basic		
Unit Weight	kN/m ³	13,86
Cohesion	kPa	4,6091255
Phi	°	29
Material Model	-	Mohr-Coulomb
Vol. WC Fn	-	Silt W/C Function
Residual Water Content	%	6,50%

Pada Tabel 4.11 merupakan data dari γ , c dan ϕ yang akan diinputkan kedalam tanah timbunan dengan klasifikasi tanah yaitu plastisitas rendah. Setelah memasukkan nilai parameter untuk tanah dasar dan timbunan tanggul yang dibutuhkan kemudian didalam pemodelan tersebut ditentukan titik entry dan exit untuk mengetahui hasil titik kelongsoran dari slip surface pada timbunan tanggul. Hal tersebut merupakan tahapan akhir dari pemodelan untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada timbunan tanggul. Proses pemodelan ini akan dituliskan secara detail mengenai cara menjalankan *SLOPE/W* dengan *software* geoteknik (*GeoStudio*) yang dapat dilihat pada Lampiran 1 sampai Lampiran 3.

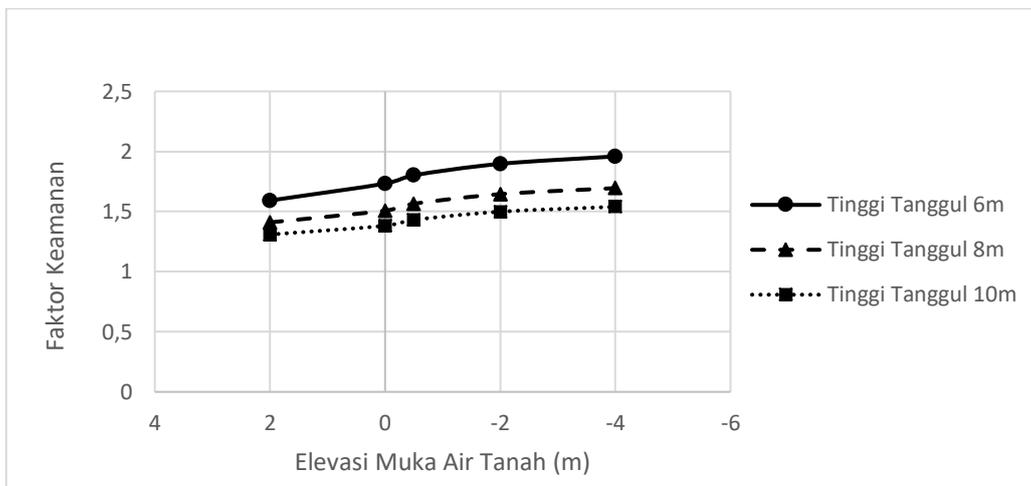
4.4.1 Pengaruh Tinggi Elevasi Muka Air Tanah terhadap Stabilitas Tanggul

Pemodelan tanggul ini dilakukan untuk mengetahui keamanan stabilitas lereng yang sudah mengalami perubahan iklim dengan menerapkan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian, kemiringan dan elevasi muka air tanah. Gambar 4.6 merupakan ilustrasi geometri tanggul dengan variasi elevasi muka air tanah yang berbeda-beda yaitu 2 m, 0 m, -0,5 m, 2 m dan 4 m. Konfigurasi variasi kemiringan tanggul (1:x) yaitu 1:1, 1:1.5 dan 1:2, sedangkan konfigurasi variasi tinggi timbunan tanggul (H) yaitu 6 m, 8 m, dan 10 m. Timbunan tanggul yang akan dimodelkan yaitu timbunan dengan tanah yang berplastisitas rendah. Penerapan pemodelan tanggul ini dapat digunakan untuk timbunan jalan, sungai atau lainnya. Pemodelan ini akan dianalisis dengan *Software Geoteknik* berupa *Geostudio* (*SEEP/W* dan *SLOPE/W*). Pada lapisan tanah bawah tanggul memiliki kedalaman 30 m dengan 6 lapisan tanah yang berbeda yang dapat dilihat pada data hasil tanah dasar Boring Log DB-01 yang dapat dilihat lengkap pada Lampiran 5. Pada pemodelan stabilitas tanggul material LuSi yang distabilisasi kapur dengan memperhatikan parameter *matric suction*, pada tahapan awal yaitu *SEEP/W* dan dilanjutkan dengan analisa *SLOPE/W* dapat dilihat pada Bab IV Sub Bab 4.4.

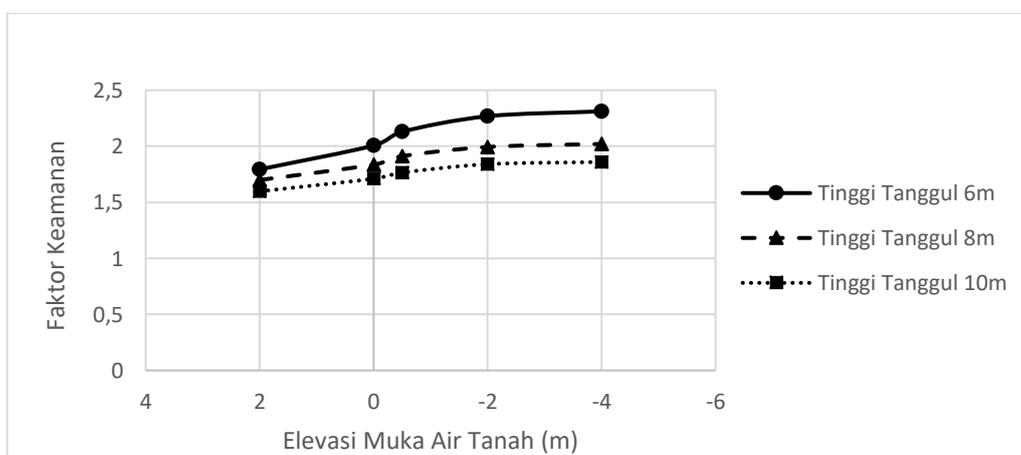


Gambar 4.6 Geometri tanggul dengan variasi elevasi muka air tanah dengan tanah timbunan berplastisitas rendah

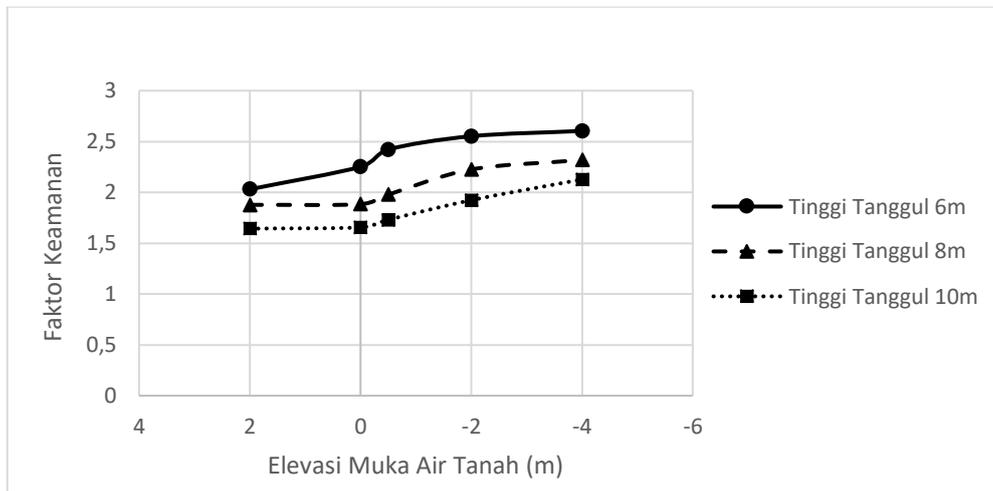
Hasil dari pemodelan tanggul setelah melewati dari 2 tahap, yang pertama tahap proses *SEEP/W* terlebih dahulu kemudian dilanjutkan tahap kedua *SLOPE/W* didapatkan hasil seperti Gambar 4.7.a. Pada hasil pemodelan tanggul tersebut untuk tinggi tanggul 6 m, kemiringan 1:1 semakin rendah elevasi muka air tanahnya maka nilai faktor keamanan mengalami peningkatan. Hal tersebut dikarenakan nilai *suction* memberikan nilai besar yang membuat tegangan tanah menjadi lebih besar. Gambar 4.7.b dan Gambar 4.7.c juga mengalami hal yang sama dengan Gambar 4.7.a semakin rendahnya elevasi muka air tanah maka nilai faktor keamanan tanggul mengalami peningkatan yang membuat tanggul masih dalam kondisi longsor jarang terjadi (Lereng Relative Stabil) dengan nilai factor keamanan $SF > 1,25$. Nilai dari faktor keamanan berdasarkan intensitas kelongsorannya Menurut Bowles (1989) dan SNI 8460:2017 dapat dilihat pada Bab II Sub Bab 2.8.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Kurva hasil pemodelan tanggul elevasi muka air tanah dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1,5; c) Kemiringan 1:2

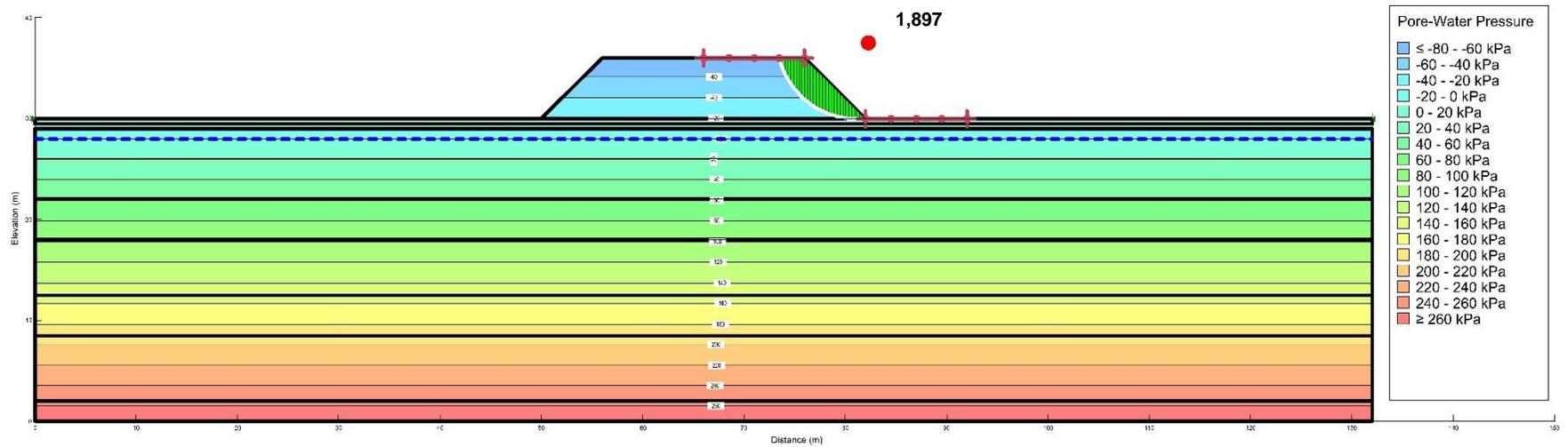
Sumber : Data Primer

Nilai FS semakin besar akibat perubahan kemiringan suatu lereng yang semakin landai. Semakin tinggi elevasi muka air tanah dari dasar tanggul akan memperkecil angka keamanan tanggul. Untuk pengaruh ketinggian tanggul dimana yang dicoba adalah tinggi 6m, 8m dan 10m, pada kelandaian yang sama, tanggul yang lebih tinggi mempunyai angka keamanan yang lebih rendah yang dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pengaruh kenaikan elevasi muka air tanah pada tanggul dengan jenis tanah yang berplastisitas rendah pada umumnya menurunkan angka keamanan tanggul. Untuk pengaruh kelandaian makin landai, angka keamanan makin besar pada tanggul yang mengalami peningkatan tegangan air pori negative (pengeringan). Faktor ketinggian tanggul juga berpengaruh terhadap angka keamanan tanggul dimana semakin tinggi tanggul angka keamanan semakin berkurang.

Pada Gambar 4.8 merupakan hasil analisa dari pemodelan stabilitas tanggul dengan pengaruh elevasi muka air tanah -2 m, kemiringan 1:1, dan tinggi tanggul 6m dengan melewati proses perubahan iklim (pengaruh *suction*) pada tanggul dengan factor keamanan sebesar 1,897. Pengaruh *suction* akan terjadi pada suatu material selama ada suatu fase cair dan ruang berpori. Hal ini terjadi karena adanya kenaikan kapiler dalam suatu material berpori, yang merupakan fenomena fisika dari suatu fase cair yang bergerak keatas. Karena tanah merupakan material berpori dan air tidak mungkin dipisahkan dari tanah maka fenomena *suction* merupakan hal yang tidak bisa dipisahkan dari tanah. Setiap perilaku tanah hampir tidak pernah terpisah dari *suction*, seperti air yang tidak bisa dipisahkan dari perilaku tanah. Sehingga

suction sebenarnya merupakan parameter penting yang seharusnya tidak boleh diabaikan ketika bicara tentang perilaku tanah, khususnya tanah yang berada di atas permukaan air tanah. Semakin jauh lokasi elemen tanah dari elevasi muka air tanah maka hisapan semakin besar, sebaliknya semakin dekat elemen tanah dengan elevasi muka air tanah maka hisapan semakin kecil. Besar kecilnya *suction* ini akan sangat berpengaruh pada kelakuan baik fisik maupun mekanik dari tanah. Peningkatan nilai *suction* merupakan ciri khusus dari tanah tidak jenuh.

Perubahan fisik yang mungkin terjadi pada tanah akibat turun naiknya *suction* antara lain adalah perubahan angka pori, kadar air dan derajat kejenuhan dari tanah, dari kondisi tanah cair sampai tanah mengalami kering dan keretakan. Sedangkan perubahan mekanik tanah akibat turun naiknya *suction* umumnya adalah naik turunnya tegangan geser dan sudut geser dalam dari tanah. Pengaruh *suction* juga mempengaruhi tegangan geser tanah juga meningkat karena peningkatan *suction*. Peningkatan tegangan geser tanah membuat tanggul dalam kondisi aman, jika terjadi berkurangnya tegangan geser tanah akibat berkurangnya *suction* tanah dapat menyebabkan kelongsoran (*sliding*) yang membuat tanggul dalam kondisi tidak aman. Akibat dari perubahan-perubahan *suction* yang terjadi pada tegangan geser tanah maka kemampuan daya dukung tanah pun akan berubah, dari kondisi paling kuat sampai tanah mengalami keruntuhan.



Gambar 4.8 Hasil stabilitas tanggul pada pemodelan dengan pengaruh elevasi muka air tanah terhadap tanggul

Sumber : Data Primer

Pengaruh elevasi muka air tanah merupakan faktor yang mempengaruhi kestabilan pada tanggul, dengan adanya pengaruh *matric suction* pada keberadaan tanggul juga mempengaruhi pula kestabilan yang terjadi pada tanggul. Hasil rekapitulasi dari berbagai variasi pemodelan tanggul dengan memasukkan nilai *matric suction* kedalam timbunan tanggul dengan tanah yang berplastisitas rendah dapat dilihat pada Tabel 4.12

Tabel 4.12 Rekapitulasi Hasil Pemodelan Tanggul Elevasi Muka Air Tanah

No.	Kemiringan	Lebar (m)	Tinggi (m)	M.A.T (m)	Faktor Keamanan	Keterangan
1.	1:1	20	6	2	1,592	AMAN
				0	1,733	AMAN
				-0,5	1,802	AMAN
				-2	1,897	AMAN
				-4	1,959	AMAN
			8	2	1,41	AMAN
				0	1,508	AMAN
				-0,5	1,565	AMAN
				-2	1,645	AMAN
				-4	1,695	AMAN
			10	2	1,309	AMAN
				0	1,382	AMAN
				-0,5	1,431	AMAN
				-2	1,499	AMAN
				-4	1,54	AMAN
2.	1:1,5	20	6	2	1,794	AMAN
				0	2,007	AMAN
				-0,5	2,13	AMAN
				-2	2,268	AMAN
				-4	2,312	AMAN
			8	2	1,699	AMAN
				0	1,836	AMAN
				-0,5	1,912	AMAN

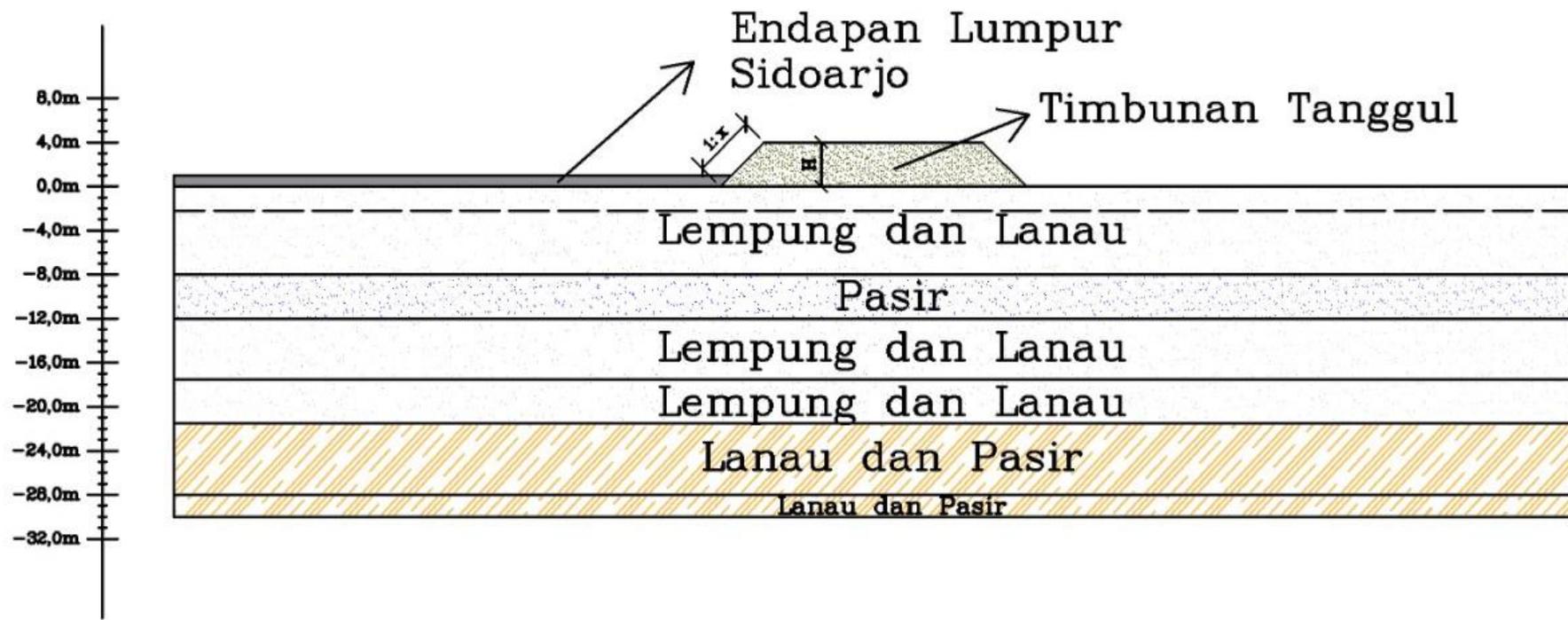
No.	Kemiringan	Lebar (m)	Tinggi (m)	M.A.T (m)	Faktor Keamanan	Keterangan
	1:1,5	20	8	-2	1,994	AMAN
				-4	2,021	AMAN
			10	2	1,598	AMAN
				0	1,711	AMAN
				-0,5	1,765	AMAN
				-2	1,84	AMAN
				-4	1,86	AMAN
3.	1:2	20	6	2	2,03	AMAN
				0	2,252	AMAN
				-0,5	2,421	AMAN
				-2	2,552	AMAN
				-4	2,604	AMAN
			8	2	1,877	AMAN
				0	1,884	AMAN
				-0,5	1,977	AMAN
				-2	2,225	AMAN
				-4	2,318	AMAN
			10	2	1,643	AMAN
				0	1,656	AMAN
				-0,5	1,73	AMAN
				-2	1,923	AMAN
				-4	2,127	AMAN

Sumber : Data Primer

4.4.2 Pengaruh Tinggi Endapan LuSi terhadap Stabilitas Tanggul

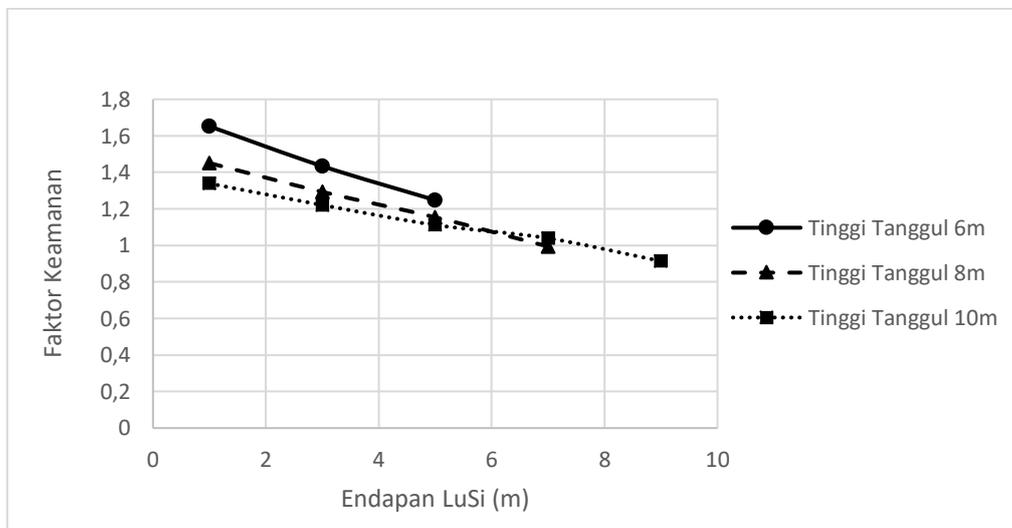
Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian, kemiringan dan endapan LuSi. Timbunan tanggul yang akan dimodelkan yaitu timbunan dengan tanah Yudong Silt (Plastisitas Rendah). Endapan LuSi yang akan dimodelkan pada *GeoStudio* ini menggunakan data sekunder dari penelitian (Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018) yaitu data kondisi *initial* 100% LuSi dengan memasukkan nilai kepadatan = $1,44 \text{ gr/cm}^3$, nilai kohesi sebesar $0,0627 \text{ kg/cm}^2$ dan nilai sudut geser sebesar $22,83^\circ$.

Penerapan pemodelan tanggul ini dapat digunakan untuk timbunan tanggul LuSi di Porong, Jawa Timur. Pemodelan ini digambarkan dengan geometri yang dapat dilihat pada Gambar 4.9 merupakan ilustrasi geometri tanggul dengan variasi endapan LuSi yang berbeda-beda yaitu 1 m, 3 m, 5 m, 7 m dan 9 m. Konfigurasi kemiringan tanggul (1:x) yaitu 1:1, 1:1.5 dan 1:2, sedangkan konfigurasi variasi tinggi timbunan tanggul (H) yaitu 6 m, 8 m, dan 10 m. Timbunan tanggul yang akan dimodelkan yaitu timbunan dengan tanah yang berplastisitas rendah. Penerapan pemodelan tanggul ini dapat digunakan untuk timbunan di Lumpur Sidoarjo, Porong. Pemodelan ini akan dianalisis dengan *Software Geoteknik* berupa *Geostudio* (*SEEP/W* dan *SLOPE/W*). Pada lapisan tanah bawah tanggul memiliki kedalaman 30 m dengan 6 lapisan tanah yang berbeda yang dapat dilihat pada data hasil tanah dasar Boring Log DB-01 yang dapat dilihat lengkap pada Lampiran 5. Pada pemodelan stabilitas tanggul material LuSi yang distabilisasi kapur dengan memperhatikan parameter *matric suction*, pada tahapan awal yaitu *SEEP/W* dan dilanjutkan dengan analisa *SLOPE/W* dapat dilihat pada Bab IV Sub Bab 4.4.

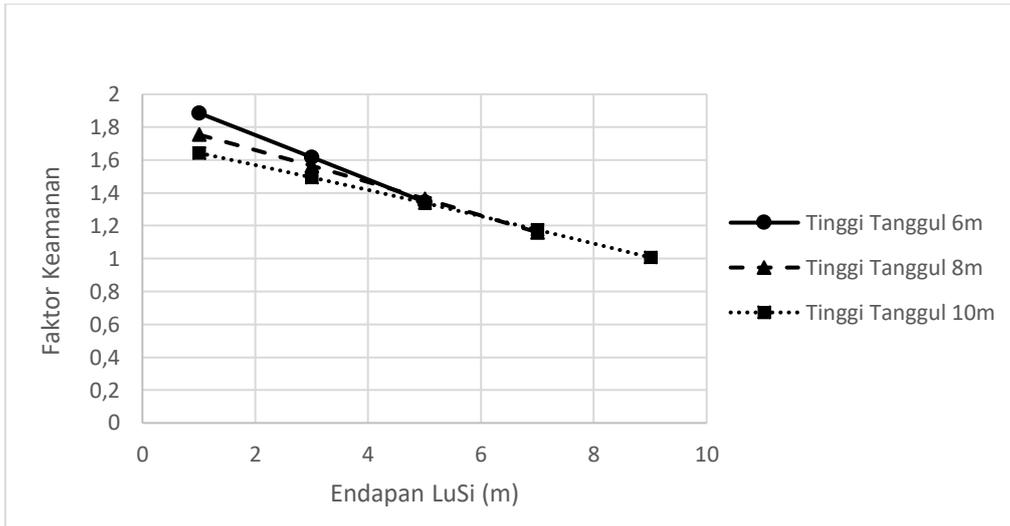


Gambar 4.9 Geometri tanggul dengan variasi tinggi endapan LuSi dengan tanah timbunan berplastisitas rendah

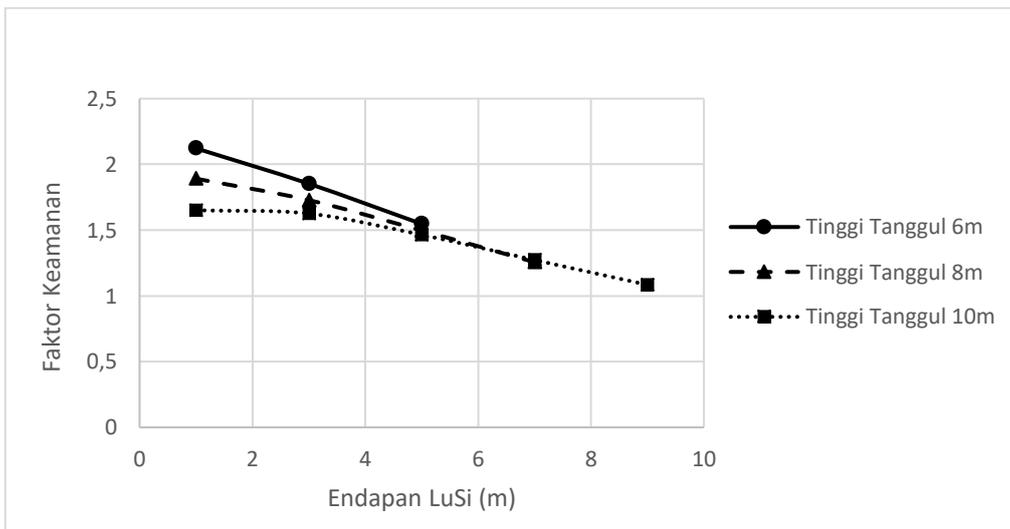
Hasil dari pemodelan tanggul dengan variasi endapan LuSi setelah melewati dari 2 tahap, yang pertama tahap proses *SEEP/W* terlebih dahulu kemudian dilanjutkan tahap kedua *SLOPE/W* didapatkan hasil seperti Gambar 4. 10.a. Pada hasil pemodelan tanggul tersebut untuk tinggi tanggul 6 m, kemiringan 1:1 semakin tebal atau dalam endapan LuSinya maka nilai faktor keamanan mengalami penurunan. Hal tersebut juga terjadi sama pada Gambar 4.9.b dan Gambar 4.9.c. Nilai faktor keamanan tanggul dengan variasi endapan LuSi mengalami penurunan dengan semakin tingginya tanggul yang membuat tanggul masih dalam kondisi Longsor bisa terjadi/sering (Lereng Stabil) dengan nilai factor keamanan $SF < 1,07$ pada kemiringan 1:1 dengan tinggi tanggul 8 m serta kedalaman 7 m dan terjadi pada kemiringan 1:1 dengan tinggi tanggul 10 m serta kedalaman LuSi 7-9 m. Hasil pemodelan stabilitas tanggul ini untuk mengetahui nilai dari faktor keamanan berdasarkan intensitas kelongsorannya Menurut Bowles (1989) dan SNI 8460:2017 dapat dilihat selengkapnya pada Bab II Sub Bab 2.8.



(a)



(b)



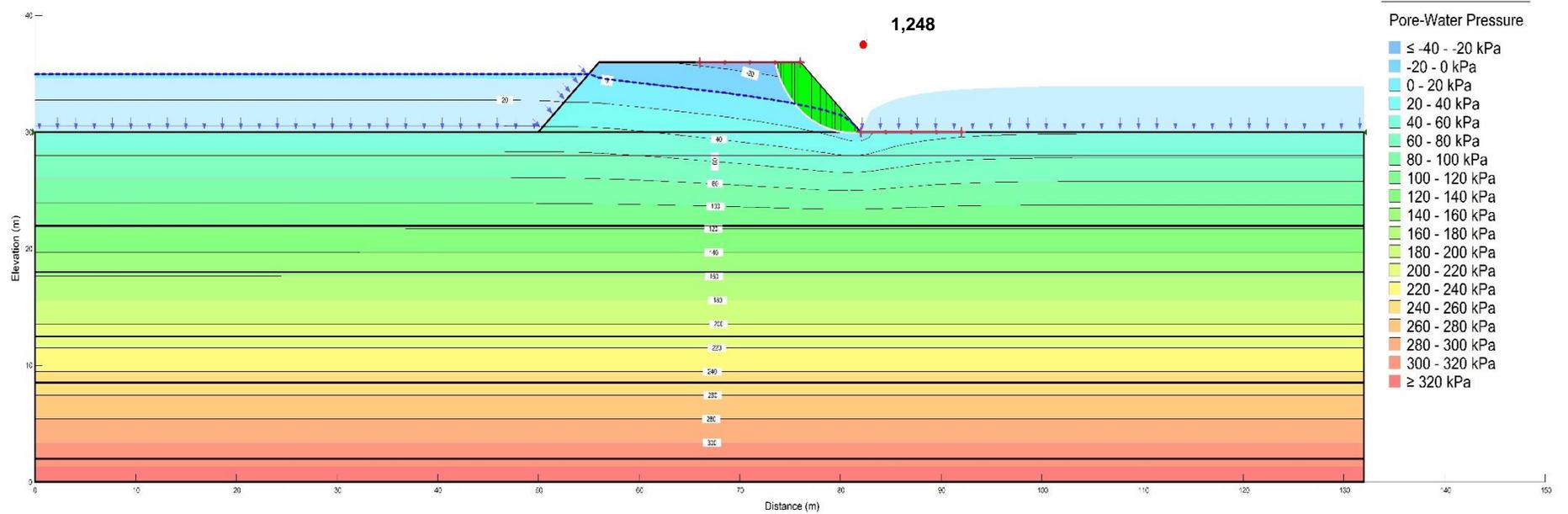
(c)

Gambar 4.10 Kurva hasil pemodelan tanggul endapan LuSi dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1,5; c) Kemiringan 1:2

Sumber : Data Primer

Pada hasil pemodelan tersebut, nilai faktor keamanan semakin besar akibat perubahan kemiringan suatu lereng yang semakin landai. Semakin tinggi endapan LuSi dari dasar tanggul akan memperkecil angka keamanan tanggul. Untuk pengaruh ketinggian tanggul dimana yang dicoba adalah tinggi 6 m, 8 m dan 10 m, pada kelandaian yang sama, tanggul yang lebih tinggi mempunyai angka keamanan yang lebih rendah yang dapat dilihat pada Gambar 4.9. Pengaruh tinggi endapan LuSi pada tanggul dengan jenis tanah yang berplastisitas rendah pada umumnya menurunkan angka keamanan tanggul.

Pada Gambar 4.11 merupakan hasil analisa dari pemodelan stabilitas tanggul dengan pengaruh tinggi endapan LuSi 5 m, kemiringan 1:1, dan tinggi tanggul 6 m dengan melewati proses perubahan iklim (pengaruh *suction*) pada tanggul dengan faktor keamanan sebesar 1,248. Sama halnya dengan pengaruh tinggi muka air tanah terhadap stabilitas tanggul, bahwa *suction* juga mempengaruhi tegangan geser tanah meningkat karena peningkatan *suction*. Peningkatan tegangan geser tanah membuat tanggul dalam kondisi aman, jika terjadi berkurangnya tegangan geser tanah akibat berkurangnya *suction* tanah dapat menyebabkan kelongsoran (*sliding*) yang membuat tanggul dalam kondisi tidak aman. Akibat dari perubahan-perubahan *suction* yang terjadi pada tegangan geser tanah maka kemampuan daya dukung tanah pun akan berubah, dari kondisi paling kuat sampai tanah mengalami keruntuhan. Pengaruh paling besar terjadi pada tinggi endapan LuSi yang membuat tegangan geser tanah mengalami penurunan atau kemampuan daya dukung tanah berubah. Semakin tinggi endapan LuSi pada samping tanggul maka akan mempengaruhi kestabilan tanggul yang mengakibatkan tanah mengalami keruntuhan.



Gambar 4.11 Hasil stabilitas tanggul pada pemodelan dengan pengaruh tinggi endapan LuSi terhadap tanggul

Sumber : Data Primer

Faktor ketinggian tanggul juga berpengaruh terhadap angka keamanan tanggul dimana semakin tinggi tanggul angka keamanan semakin berkurang, yang dapat dilihat pada Tabel 4.13 untuk hasil rekapitulasi dari berbagai variasi pemodelan tanggul dengan endapan LuSi pada timbunan tanggul yang memiliki plastisitas rendah.

Tabel 4.13 Rekapitulasi Hasil Pemodelan Tanggul Endapan LuSi

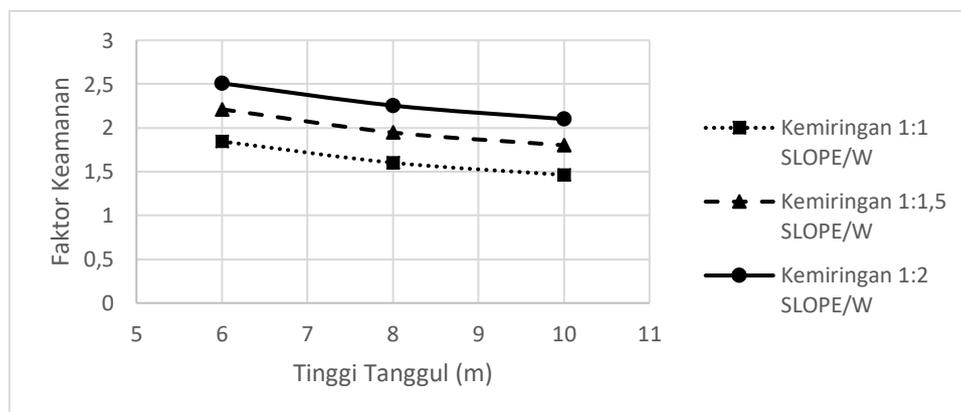
No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Endapan LuSi (m)	Faktor Keamanan	Keterangan		
1.	1:1	6	1	1,652	AMAN		
			3	1,434	AMAN		
			5	1,248	TIDAK AMAN		
		8	1	1,451	AMAN		
			3	1,293	AMAN		
			5	1,154	TIDAK AMAN		
			7	0,994	TIDAK AMAN		
		10	1	1,339	AMAN		
			3	1,221	TIDAK AMAN		
			5	1,112	TIDAK AMAN		
			7	1,039	TIDAK AMAN		
			9	0,914	TIDAK AMAN		
		2.	1:1,5	6	1	1,886	AMAN
					3	1,617	AMAN
					5	1,345	AMAN
8	1			1,754	AMAN		
	3			1,565	AMAN		
	5			1,364	AMAN		
	7			1,16	TIDAK AMAN		
10	1			1,643	AMAN		
	3			1,494	AMAN		
	5			1,339	AMAN		
	7			1,175	TIDAK AMAN		
	9			1,007	TIDAK AMAN		
3.	1:2			6	1	2,122	AMAN
					3	1,853	AMAN
					5	1,547	AMAN
		8	1	1,891	AMAN		
			3	1,728	AMAN		

No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Endapan LuSi (m)	Faktor Keamanan	Keterangan
	1:2	8	5	1,497	AMAN
			7	1,256	AMAN
		10	1	1,651	AMAN
			3	1,626	AMAN
			5	1,464	AMAN
			7	1,273	AMAN
			9	1,084	TIDAK AMAN

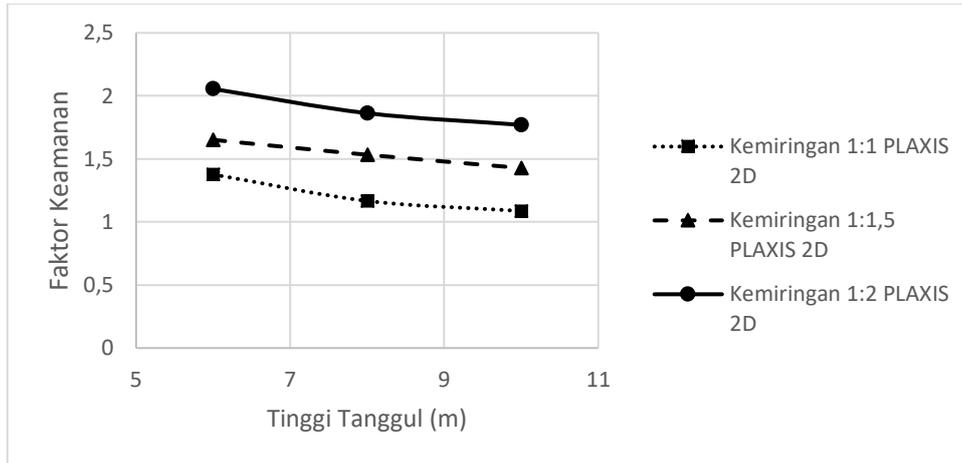
Sumber : Data Primer

4.4.3 Perbandingan Faktor Keamanan dengan *Geostudio* dan *PLAXIS 2D*

Hasil perbedaan nilai faktor keamanan pada Gambar 4.12 menunjukkan bahwa semakin tinggi tanggul maka nilai faktor keamanan tanggul yang dialami akan mengalami penurunan dan semakin landai tanggul maka nilai factor keamanan mengalami peningkatan. Hal tersebut terjadi pada pemodelan *SLOPE/W* dan *PLAXIS 2D* untuk kondisi tanah yang berplastisitas rendah dengan variasi kemiringan pada tanggul. Perbedaan hasil nilai faktor keamanan tersebut juga dipengaruhi pada input parameter, yang dimana pada *PLAXIS 2D* tidak memasukkan nilai *matric suction* pada timbunan tanggul, sedangkan *SLOPE/W* memasukkan nilai *matric suction* pada timbunan tanggul.



(a)



(b)

Gambar 4.12 Kurva hasil faktor keamanan tanggul pada : a) *PLAXIS 2D* ; b) *SLOPE/W*

Sumber : Data Primer

Hasil faktor keamanan pada tanggul dengan 2 jenis software geoteknik yang berbeda, dapat dilihat terdapat perbedaan hasil diantara keduanya yaitu hasil faktor keamanan dengan *SLOPE/W* menghasilkan angka faktor keamanan yang lebih besar karena adanya pengaruh dari nilai *matric suction* pada timbunan tanggul dibandingkan dengan *PLAXIS 2D* yang tidak adanya pengaruh nilai *matric suction*. Hal tersebut sama terjadi pada tanggul dengan variasi kemiringan dan ketinggian tanggul. Pengaruh dari *suction* mempengaruhi tegangan geser tanah yang dapat membuat kemampuan daya dukung tanah menjadi besar daripada tanpa pengaruh *matric suction*. Pengaruh *matric suction* sendiri tidak dapat dipastikan sama seiring penambahan atau pengurangan air, tetapi lebih pada proses berulang yang akan membuat jalur tegangan yang berbeda. Pada hasil perbedaan faktor keamanan dengan 2 (dua) jenis program yang berbeda, dapat melihat perbedaan hasil dari faktor keamanan yang dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Rekapitulasi Hasil Faktor Keamanan Tanggul pada *PLAXIS 2D* dengan *SLOPE/W*

No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Faktor Keamanan	
			<i>SLOPE/W</i>	<i>PLAXIS 2D</i>
1.	1:1	6	1,845	1,377
		8	1,602	1,167
		10	1,463	1,087

No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Faktor Keamanan	
			<i>SLOPE/W</i>	<i>PLAXIS 2D</i>
2.	1:1,5	6	2,212	1,651
		8	1,947	1,533
		10	1,801	1,428
3.	1:2	6	2,509	2,055
		8	2,255	1,863
		10	2,101	1,77

Sumber : Data Primer

4.5 Perhitungan Penurunan Segera (*Immediate Settlement*) pada Tanggul

Parameter tanah yang belum diketahui ditentukan dengan korelasi nilai SPT rata-rata dari uji Bor Log. Oleh karena itu data tanah pada tabel dipilih sebagai korelasi parameter tanah dalam Bab III Sub.Bab 3.1. Selanjutnya dilakukan pemodelan dengan kedalaman tanah 30 meter. Pada saat pemodelan penurunan tanggul pada *Plaxis 2D* type model yang digunakan *Axisymetris* dengan *elements 15-Noded*. Material parameter tanah dasar dan timbunan dapat dilihat pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16.

Tabel 4.15 Parameter Tanah Dasar dan Timbunan PLAXIS 2D

Parameter	Name	Lempung dan Lanau	Pasir	Lempung dan Lanau	Lempung dan Lanau	Unit
General						
Material Model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Type of material behaviour	Type	Undrained (B)	Drained	Undrained (B)	Undrained (B)	-
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	15,1	17	14,2	13,4	kN/m ³
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	16	18	18	18	kN/m ³

Parameters						
Young's modulus	E'_{ref}	8000	25000	9000	9000	kN/m ²
Shear Strength	ϕ'	28	8	5	8	°
Poisson's ratio	ν' (nu)	0,3	0,35	0,3	0,3	-
Cohesion	c'_{ref}	8,825985	9,80665	6,864655	9,80665	kN/m ²
Permeability in horizontal direction	k_x	1,00E-03	1	1,00E-03	1,00E-03	m/day
Permeability in vertical direction	k_y	1,00E-03	1	1,00E-03	1,00E-03	m/day

Sumber : Hasil Analisa

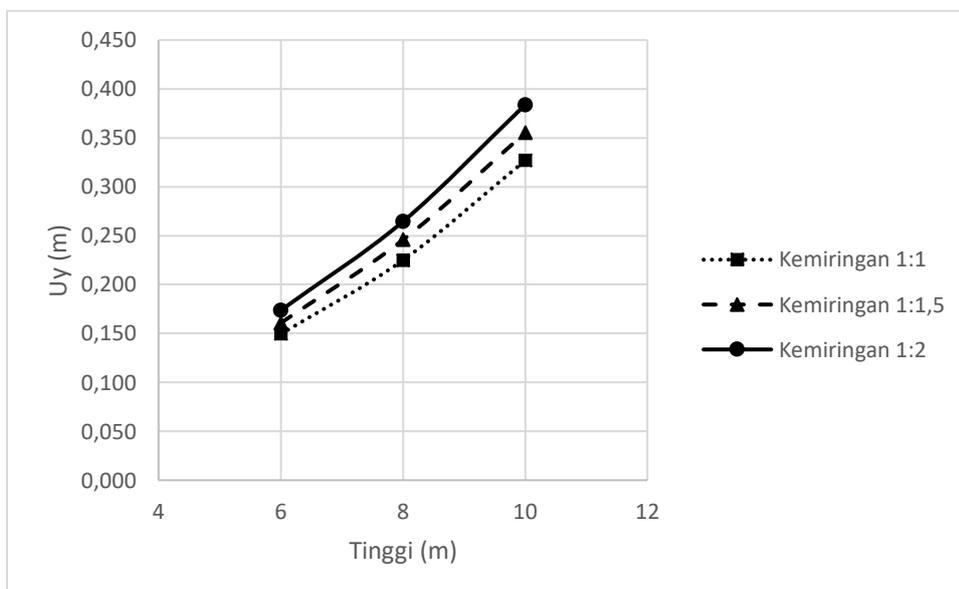
Tabel 4.16 Parameter Tanah Dasar dan Timbunan PLAXIS 2D (lanjutan)

Parameter	Name	Lanau dan Pasiran	Lanau dan Pasiran	Embankment	Unit
General					
Material Model	Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-
Type of material behaviour	Type	Undrained (B)	Undrained (B)	Drained	-
Soil unit weight above phreatic level	γ_{unsat}	14,2	18	13,86	kN/m ³
Soil unit weight below phreatic level	γ_{sat}	18	18	18	kN/m ³
Parameters					
Young's modulus	E'_{ref}	15000	20000	10000	kN/m ²
Shear Strength	ϕ'	26	36	29	°
Poisson's ratio	ν' (nu)	0,3	0,3	0,3	-
Cohesion	c'_{ref}	9,80665	19,6133	4,6091255	kN/m ²
Permeability in horizontal direction	k_x	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	m/day

Parameters					
Permeability in vertical direction	k_y	1,00E-01	1,00E-01	1,00E-01	m/day

Sumber : Hasil Analisa

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa semakin tinggi tanggul maka penurunan yang dialami akan semakin besar pula terjadi. Hasil analisis perhitungan besar penurunan segera dengan menggunakan program *PLAXIS 2D* mendapatkan nilai sebesar 14-38 cm/ setiap 200 hari. Penurunan tersebut juga berpengaruh karena variasi geometri tanggul berbeda. Hasil dari penurunan tanggul dengan *PLAXIS 2D* dapat dilihat nilai penurunannya pada Tabel 4.17. Pada proses pemodelan penurunan tanggul dengan *PLAXIS 2D* dapat dilihat secara detail cara pengerjaan pada Lampiran 4.



Gambar 4.13 Kurva hasil penurunan tanggul dengan *PLAXIS 2D*

Sumber : Data Primer

Tabel 4.17 Rekapitulasi Hasil Penurunan Tanggul pada *PLAXIS 2D*

No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Uy (m)	Uy (cm)
1.	1:1	6	0,149	14,938
		8	0,225	22,500
		10	0,327	32,683

No.	Kemiringan	Tinggi (m)	Uy (m)	Uy (cm)
2.	1:1,5	6	0,161	16,075
		8	0,246	24,573
		10	0,355	35,520
3.	1:2	6	0,174	17,370
		8	0,264	26,443
		10	0,384	38,387

Sumber : Data Primer

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa yang telah dilakukan, diambil kesimpulan :

1. Pemodelan tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur dengan memperhatikan parameter *matric suction* dengan melakukan validasi kebenaran model *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) sesuai dengan hasil pemodelan *SEEP/W* bertujuan untuk mengetahui proses pemodelan sudah berjalan, untuk mengetahui posisi nilai *matric suction* yang sesuai dengan SWCC, jika sudah sesuai dengan kebenaran model dari SWCC akan dilanjutkan ke tahap perhitungan *SLOPE/W*. Pada data SWCC dari *Yudong Silt* (Plastisitas Rendah) terdapat nilai *matric suction* 40 kPa kemudian akan dikonversikan kedalam satuan meter dengan hasil 4 m. Hasil validasi tersebut dapat dikatakan sesuai, artinya kebenaran model *SWCC* sudah terverifikasi dengan pemodelan pada *SEEP/W* dan bisa dilakukan analisis ketahap *SLOPE/W*, jika sudah tervalidasi.
2. Stabilitas dari tanggul yang terbuat dari material LuSi distabilisasi kapur dengan memperhatikan parameter *matric suction*, untuk kondisi elevasi muka air tanah dan tinggi endapan Lusi yang berbeda sebagai berikut :
 - Kondisi elevasi muka air tanah yang berbeda, semakin rendah elevasi muka air tanahnya maka nilai faktor keamanan mengalami peningkatan. Nilai *matric suction* memberikan nilai besar yang membuat tegangan tanah menjadi lebih besar, berbagai variasi ketinggian dan kemiringan yang dihasilkan dari elevasi muka air tanah, didapatkan nilai faktor keamanan tanggul mengalami peningkatan yang membuat tanggul masih dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan nilai faktor keamanan lebih dari 1,25 dengan rentang faktor keamanan 1,3–2,6 pada kondisi geometri tanggul dengan kemiringan (1:1, 1:1.5 dan 1:2) dari variasi tinggi tanggul (6 - 10 m).
 - Kondisi tinggi endapan LuSi yang berbeda, semakin tinggi endapan LuSi, maka nilai faktor keamanan mengalami penurunan. Pada variasi kemiringan tanggul dan tinggi tanggul nilai faktor keamanan tanggul mengalami penurunan yang membuat tanggul dalam 3 kondisi berbeda. Kondisi pertama, pengaruh tinggi endapan LuSi dengan kemiringan tanggul 1:1 dengan tinggi timbunan mulai dari

6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai faktor keamanan tanggul 1,29–1,65. Kondisi kedua, dengan kemiringan tanggul 1:2 dengan tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai factor keamanan tanggul 1,3–1,8. Kondisi Ketiga, pengaruh tinggi endapan LuSi dapat dikatakan dengan kemiringan 1:2, tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-7 m mendapatkan nilai faktor keamanan tanggul dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan rentang factor keamanan 1,25–2,12.

Hasil pemodelan tersebut juga menyatakan bahwa semakin curam kemiringan tanggul maka nilai SF semakin kecil, artinya semakin landai tanggul nilai SF semakin besar atau dapat dikatakan tanggul dalam kondisi aman.

3. Besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur, nilai penurunan berkisar 14 - 40 cm setiap 200 hari, penurunan pada tanggul tersebut bergantung dengan geometri pemodelan pada variasi tinggi dan kemiringan pada tanggul.

5.2 Saran

Dari hasil analisa yang telah dilakukan, saya memberikan saran sebagai berikut:

1. Penelitian LuSi yang saya lakukan perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik dari LuSi pada kondisi awal (initial), dan Lusi yang distabilisasi dengan kapur agar bisa dianalisis kedalam *software* geoteknik berdasarkan data primer bukan dari data sekunder atau didukung dari data penelitian terdahulu.
2. Penelitian LuSi perlu dilakukan pengujian proses pembasahan dan pengeringan (perubahan iklim) dengan 3 siklus serta pengujian secara mikroskopis. Kondisi LuSi yang dipakai harus diuji kandungan minyaknya terlebih dahulu, karena dikhawatirkan ada perbedaan kandungan minyak untuk pengambilan sampel yang diperoleh dari tempat, jarak dan kedalaman yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, M. Braja, 1985, Mekanika Tanah 1 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis), Erlangga, Jakarta.
- Das, M. Braja, 1985, Mekanika Tanah 2 (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis), Erlangga, Jakarta.
- Das, M. Braja, 1990, "Principles of Foundation Engineering, Second Edition", Brooks Cole
- Ingles, O.G., and Metacalf J.B., 1972, "Soil Stabilization Principles and Practice", Butterworths, Sydney-Melbourne-Brisbane
- Jones, N., 1999, "Mass Stabilization (In Swedish)", Licentiate thesis, Department of Soil Mechanics Lund Institute of Technology, Lund University, Lund
- Fredlund, 1995. "The Scope Of Unsaturated Soil Mechanics".University of Saskatchewan. Saskatoon. Canada.
- Fredlund, 1996. "The emergence of unsaturated soil mechanics - The fourth Spencer J. Buchanan Lecture". Texas A&M University. Texas.
- Fredlund, 2000. "The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering, - R.M. Hardy Address". NRC Research Press website. University of Saskatchewan. Saskatoon. Canada.
- Fredlund & Rahardjo, 1993, "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". A Willeyinterscience publication. John Wiley & Sons, Inc. 1-19.
- Fredlund, D.G, Rahardjo, H. & Fredlund, M.D. 2012, "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice". A Willey-interscience publication. John Wiley & Sons, Inc. ,520 - 578.
- Fredlund , D. G. and Morgenstern, N.R. (1977), " Stress State Variables for Unsaturated Soil " Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, 5(103), 447 – 466
- Hardiyatno, H.C. 1992. Mekanika tanah I. Gramedia, Jakarta.
- Robert D. Holtz and William D. Kovacs (1981) "An Introduction To Geotechnical Engineering", Prentice –Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
- Iis Faizah, 2013, Peningkatan Perilaku Lumpur Sidoarjo (LUSI) dengan Bahan Additive untuk Material Urugan, Tesis Teknik Sipil : Surabaya
- Herlinawati, 2018, Pengaruh Kadar Air dan Nilai Matric Suction dalam Penentuan Parameter Teknis Tanah Jenuh Sebagian, Jurnal Teknik UGM : Yogyakarta

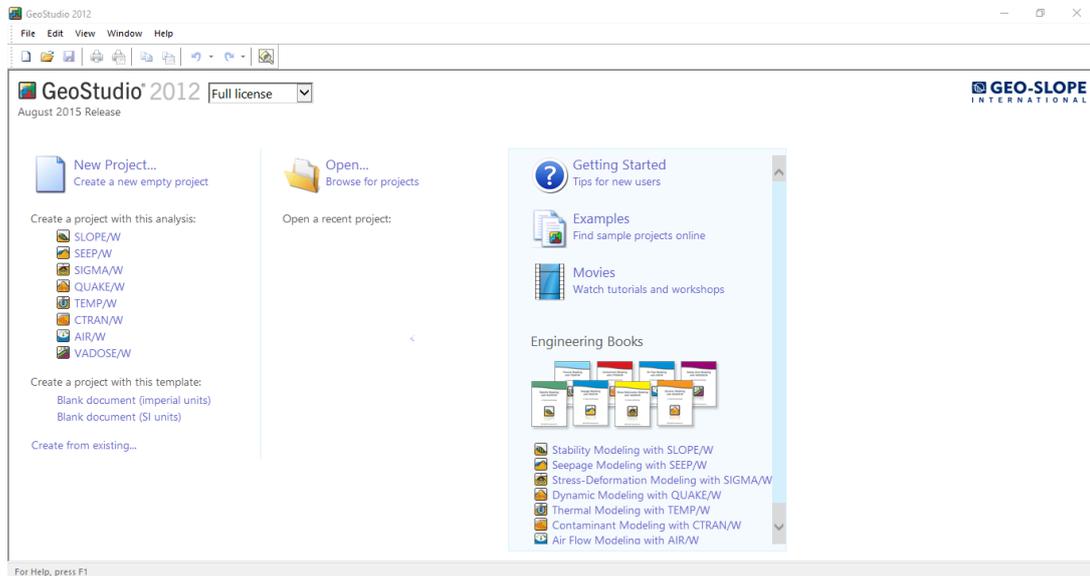
- Junran Zhang et al, 2018, Influences of Drying and Wetting Cycles and Compaction Degree on Strength of Yudong Silt for Subgrade and Its Prediction, Journal, University East Road, Nanning, Guangxi 530004, China.
- Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo, 2019, Pengujian Laboratorium Mekanika Tanah Konsep Pedoman (R-0) Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo Untuk Material Timbunan Tanggul Balai Litbang Sungai, Surakarta.
- Wiqoyah, Qunik (2006), “Pengaruh Serbuk Batu Kapur, Waktu Perawatan dan Perendaman Terhadap Kuat Dukung Tanah Lempung”. *Dinamika Teknik Sipil*, Vol.6, No.1.
- Dasyri P. dan N. E Mochtar, 2019, Modification Of Sidoarjo Lava Mud (“Lusi”) To Become Granular Material For Quality Fill Materials, Research Paper, International Association of Lowland Technology (IALT)
- Maliki Akhmad, dkk (2015), “Pemodelan dan Simulasi Butiran Halus menjadi Butiran Kasar Bergradasi Baik (Well Graded)”, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XI*, Surabaya.
- I. G. N. Wardana (2011), “Pengaruh Perubahan Muka Air Tanah dan Terasering terhadap Perubahan Kestabilan Lereng”, *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil* Vol. 15 No.1.
- Indra N. H dan D.S. Pratiwi (2018), “Analisis Stabilitas pada Lereng Sungai yang Dipengaruhi Pasang Surut”, *Media Komunikasi Teknik Sipil*, E-ISSN : 2549-6778.
- Angga Ahmad, dkk (2014), “Analisis Stabilitas Tanggul yang Distabilisasi Menggunakan Kapur, Fly Ash, dan Biobakteri Akibat Musim Hujan dan Musim Kemarau di Sungai Bengawan Solo Cross Section 0+000 dan Cross Section 0+500 Desa Semambung-Bojonegoro”, *Jurnal Teknik Pomits* Vol. 1, No. 1, (2014) 1-6.

LAMPIRAN

Lampiran 1

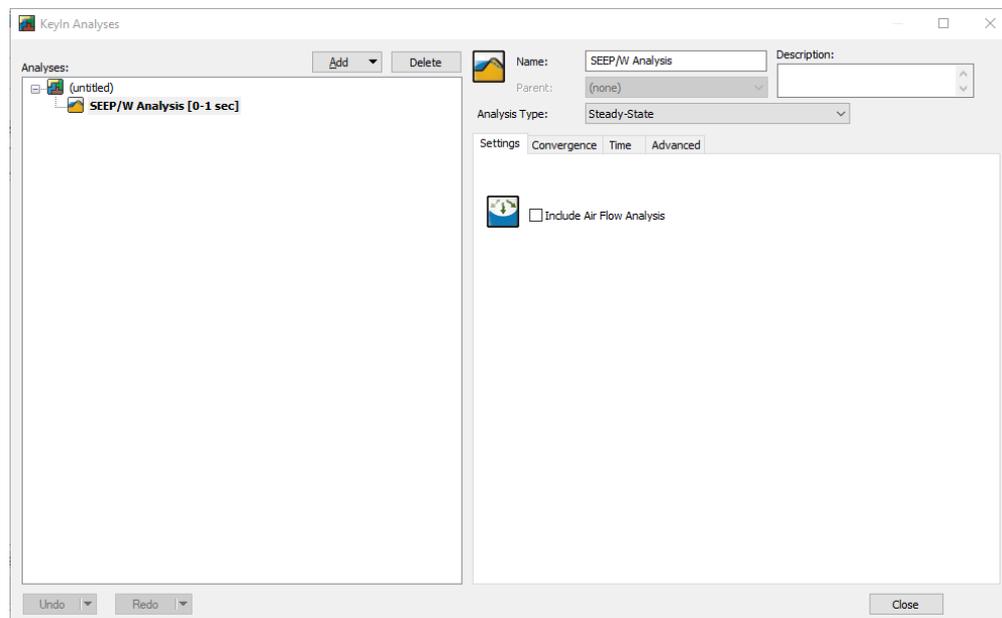
Berikut adalah langkah-langkah analisa laju rembesan (seepage) pada tubuh tanggul dengan Geo Studio SEEP/W:

1. Buka aplikasi GeoStudio



Gambar 1 Tampilan Awal GeoStudio

2. Untuk membuat project baru, lakukan hal-hal berikut :

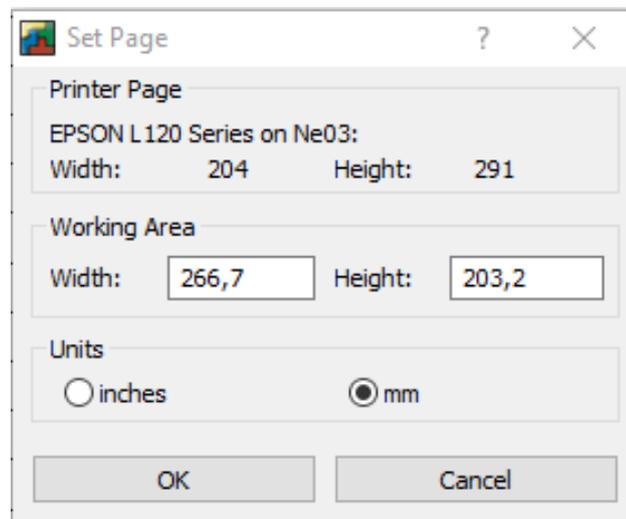


Gambar 2 Penentuan model analisis SEEP/W

- Klik New, kemudian klik SEEP/W untuk memodelkan rembesan.
- Ketik nama project di kolom title, kemudian pilih Steady-State, lalu tutup untuk memulai.

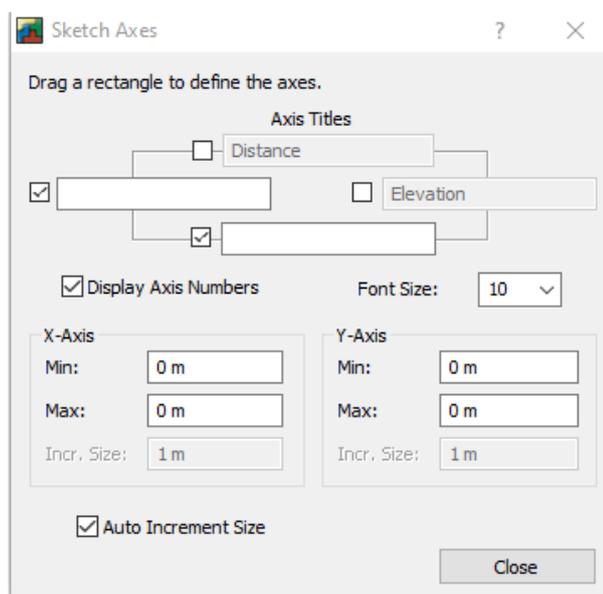
3. Mengatur lembar kerja

- Panjang dan lebar lembar kerja dapat diatur dengan klik set > page.



Gambar 3 Tampilan Set Page

- Untuk mendapatkan lembar kerja yang ideal, klik sketch > axes untuk mengatur sumbu x dan y, kemudian isi Batasan maksimal dan minimal.

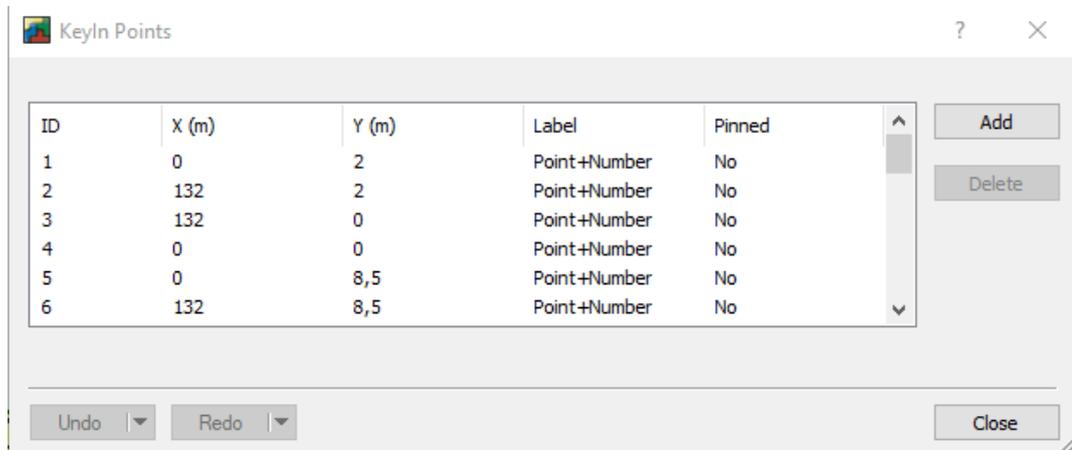


Gambar 4 Tampilan Sketch Axes

4. Menggambar object

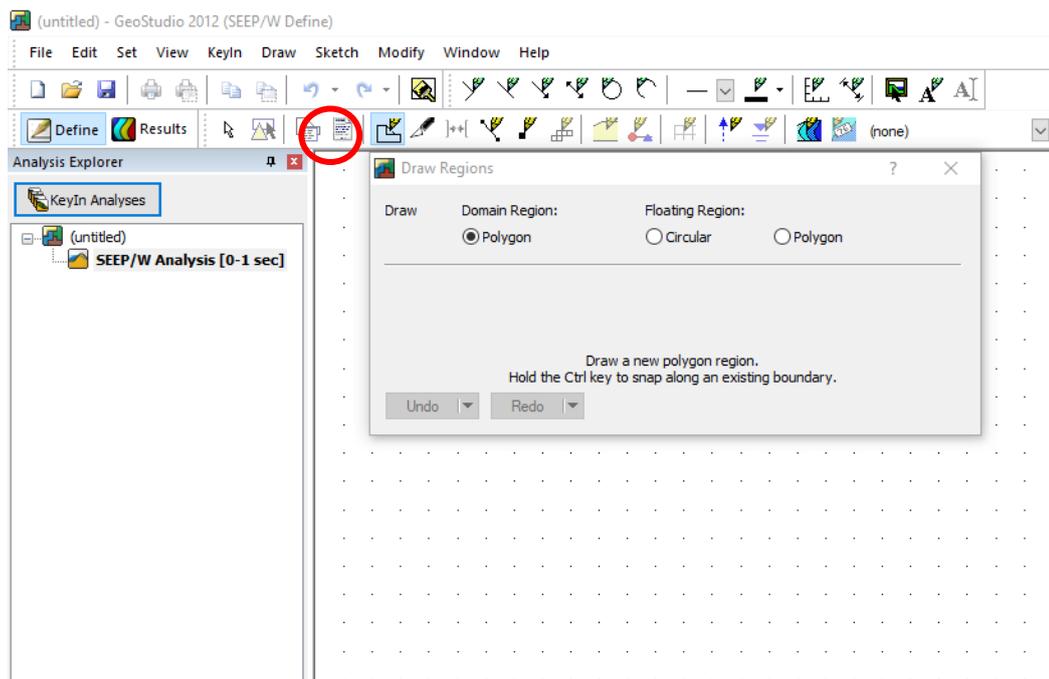
Object yang akan dimodelkan harus diketahui koordinatnya, sehingga dapat digambarkan dengan cara :

- Klik keyin > Points, kemudian tulis semua koordinat yang menggambarkan object yang akan dimodelkan

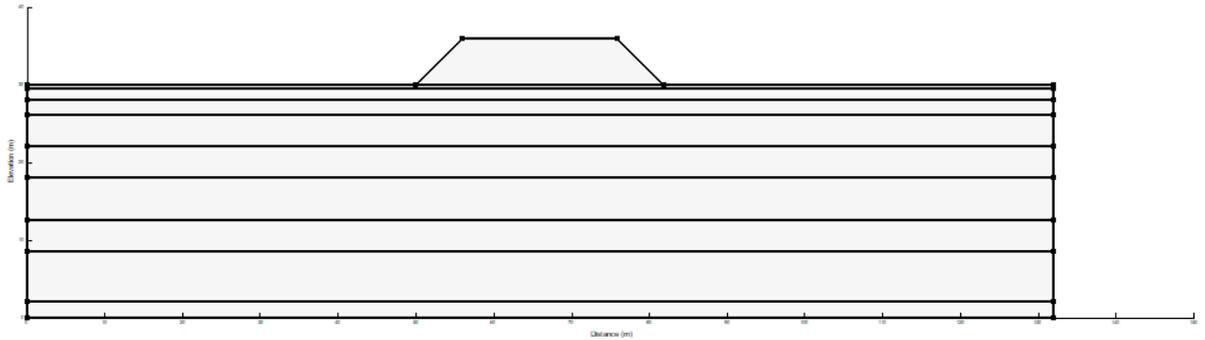


Gambar 5 Tampilan keyIn Points untuk menentukan titik rencana pemodelan

- Setelah semua titik tergambar, kemudian hubungkan tiap titik dengan klik draw > region atau klik icon pada lingkaran merah



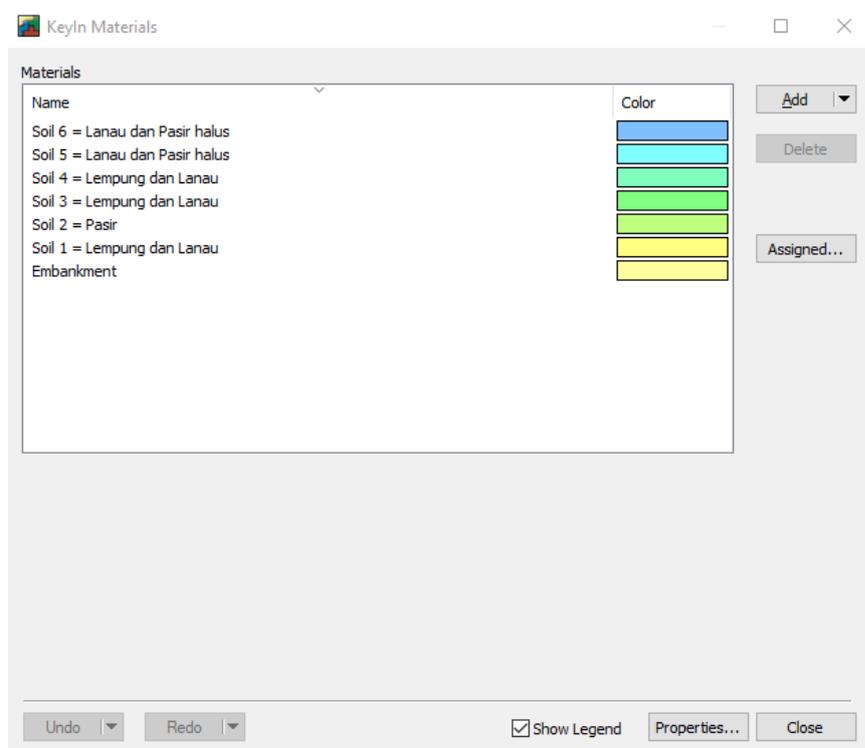
Gambar 6 Draw Region pada GeoStudio



Gambar 7 Hasil penggambaran region pada GeoStudio

5. Memasukkan data material

- Setelah object tergambar, masukkan data material. Klik KeyIn > materials > add new material.
- Nama material disesuaikan dengan material yang datanya akan dimasukkan.
- Untuk tanah penyusun tanggul, menggunakan pilihan menu Saturated/ Unsaturated, sementara untuk tanah dasar menggunakan Saturated Only.
- Nilai k_y'/k_x' dan ratio disesuaikan dengan data yang ada.

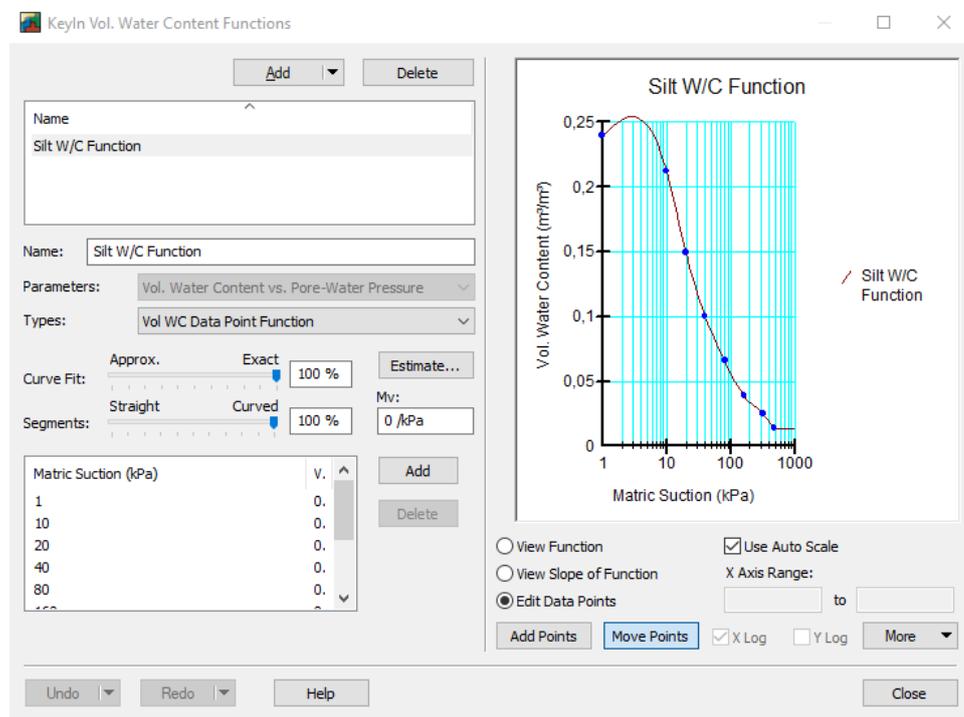


Gambar 8 Perencanaan material pada KeyIn Material

- Klik [...] pada Vol. Water Content Fn untuk menentukan jenis material tanah penyusun, untuk mengetahui kemampuannya meloloskan air. Klik add > types Vol. WC Data

Point Function > estimate > pilih material dan nilai saturated WC, perhatikan pula suction rangenya sesuai data perencanaan.

- Ulangi tahapan input material untuk material lainnya. Data tiap material mungkin berbeda sesuai dengan jenis materialnya.

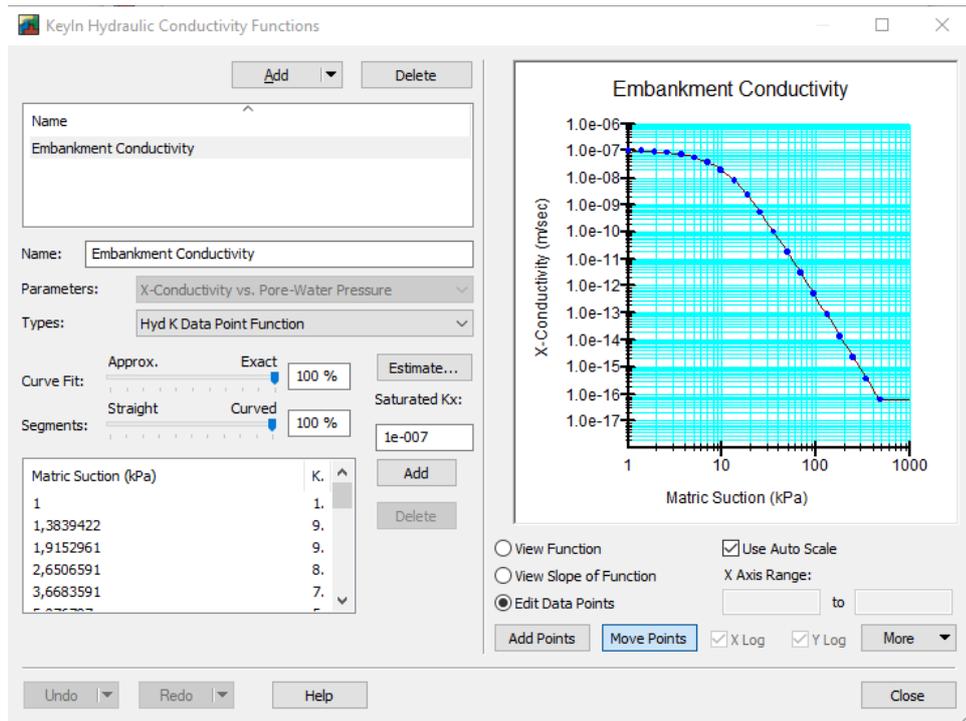


Gambar 9 KeyIn Vol. Water Content Function

Gambar 10 Estimate Vol. Water Content

- Klik [...] hydraulic conductivity, kemudian ubah nama material dan pilih Hyd K Data Point Function pada menu types. Selanjutnya klik estimate.

- Pilih metode estimasi (estimation method) sesuai dengan kebutuhan, isi kolom Saturated Kx dan Residual Water Content sesuai data yang tersedia.



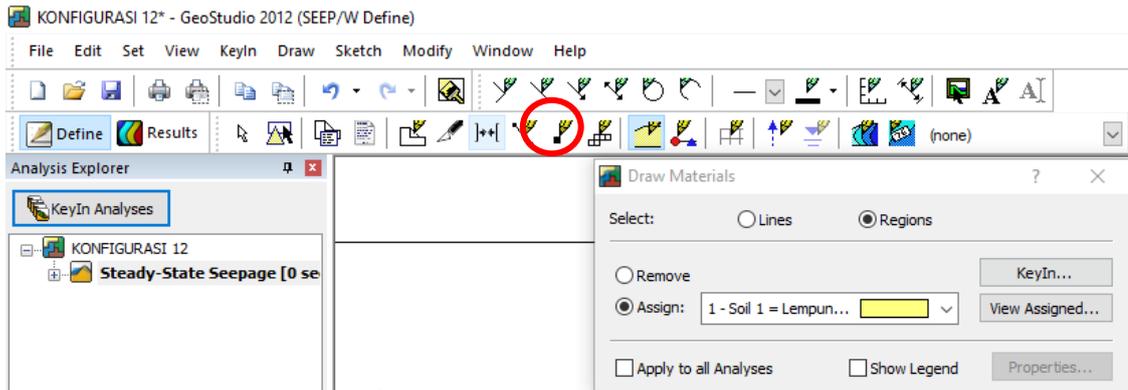
Gambar 11 Penentuan Hydraulic Conductivity Function

The screenshot shows the 'Estimate Hydraulic Conductivity Function' dialog box. It contains the following fields and values: Estimation Method: Van Genuchten; Vol. Water Content Fn: Silt W/C Function; Saturated Kx: 1e-007 m/sec; Residual Water Content: 0,065 m³/m³; Suction Range: Minimum Suction: 1, Maximum Suction: 480; Number of Points: 20. There are 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom right.

Gambar 12 Estimate Hydraulic Conductivity Function

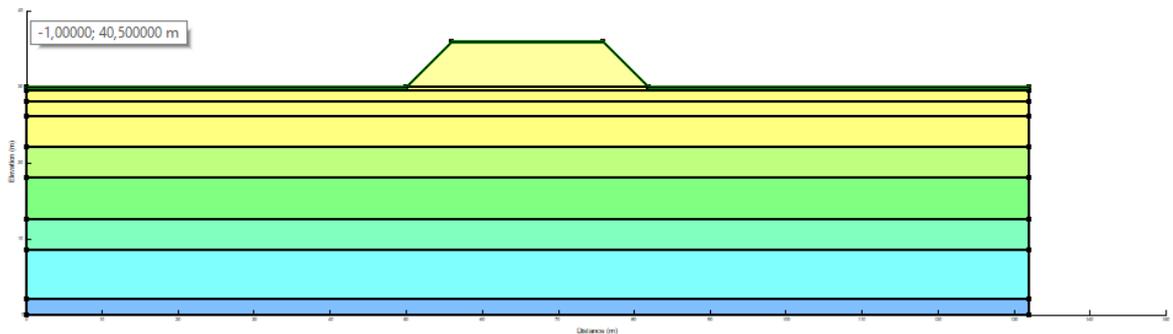
6. Material pada object

- Untuk menggambarkan material pada object yang sudah digambar, maka klik draw > materials > pilih material yang akan digambarkan > klik object. Atau bisa juga klik icon pada lingkaran merah.



Gambar 13 Menggambar material pada object

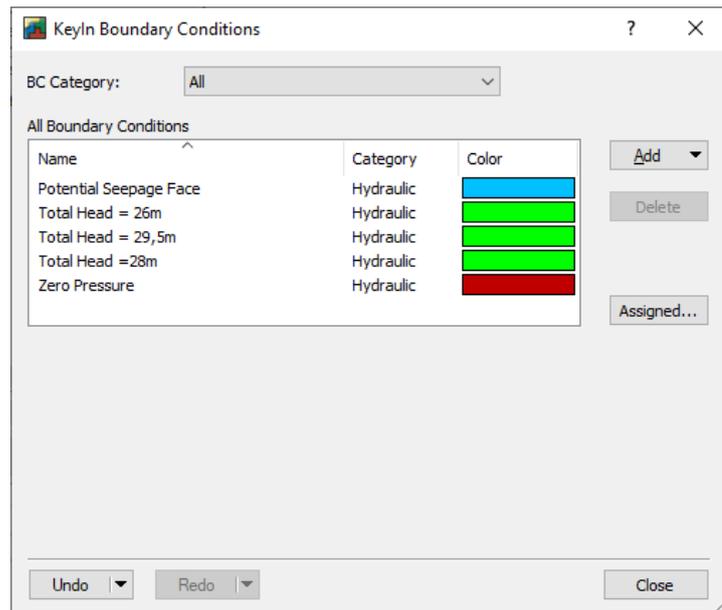
- Lakukan sampai tergambar semua material pada tanggul.



Gambar 14 Material sudah tergambar pada object

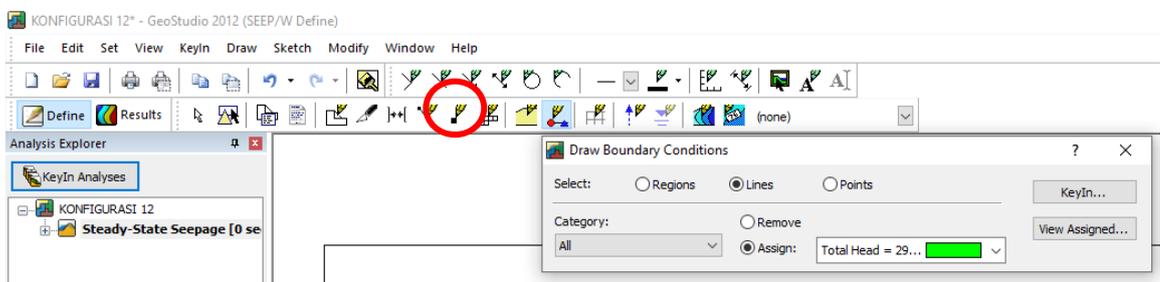
7. Membuat boundary condition

- Klik KeyIn>Boundary Conditions> Add New Hydraulic BC (Total Head atau MAT), kemudian pilih type Head, lalu isi pilihan Action dengan elevasi MAT.

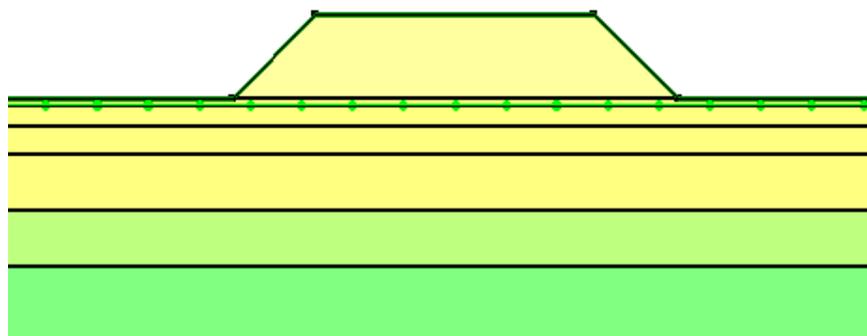


Gambar 15 Merencanakan boundary condition pada object

- Klik draw > boundary Cotions



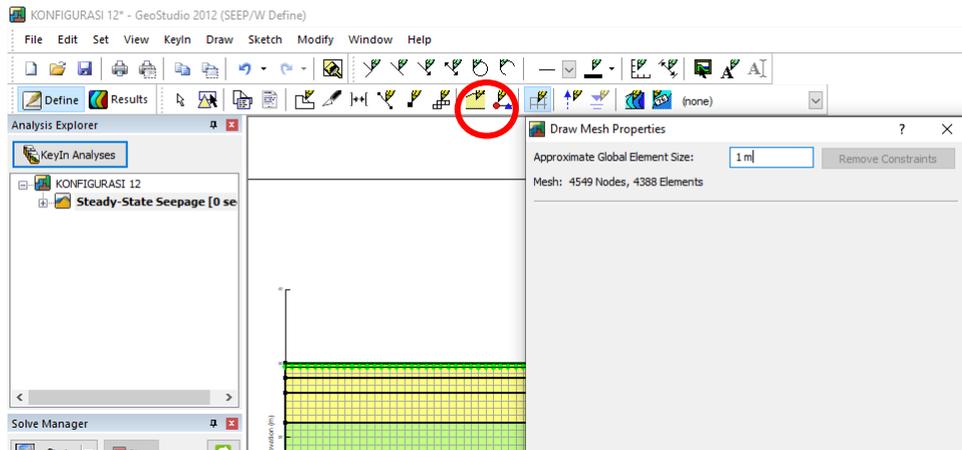
Gambar 16 Penggambaran boundary Condition pada object



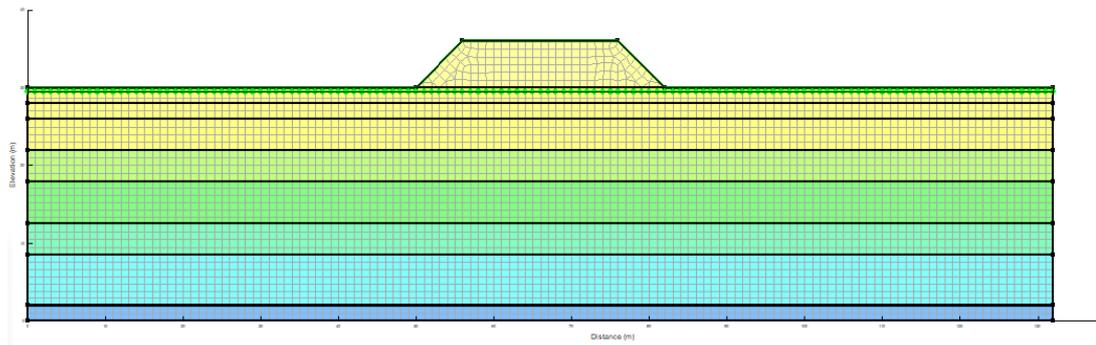
Gambar 17 Boundary Condition (Total Head) pada tanggul

8. Membuat Mesh

- Klik Draw Mesh Properties > Approximate Global Element Size, kemudian ketik 1m, jika sudah klik close.

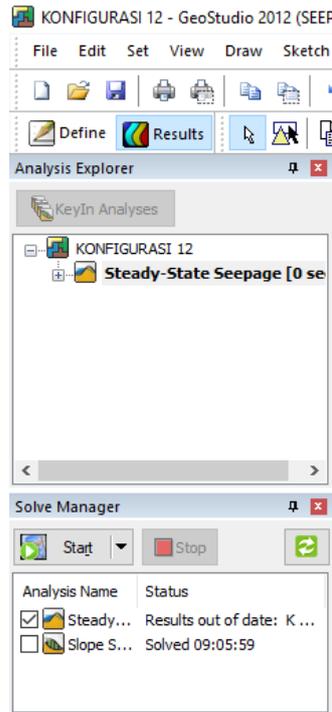


Gambar 18 Penggambaran Draw Mesh Properties pada object



Gambar 19 Penggambaran Grid

9. Lakukan penyesuaian pada pemodelan yang lain sesuai dengan rencana muka air (diatur pada boundary condition). Selanjutnya, klik kotak pada Solve Manager > Start. GeoStudio SEEP/W akan merunning hasil dari pemodelan yang telah dilakukan.

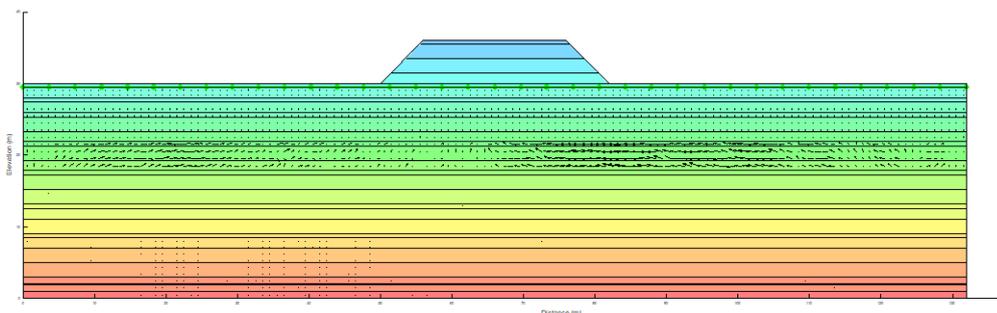


Gambar 20 Running Pemodelan

10. Setelah di run beberapa saat, akan muncul gambar seperti pada Gambar 22. Pada hasil running bias dilihat garis aliran filtrasi, kontur berdasarkan total head/ pore water pressure/ pressure head. Ketiga kondisi tersebut bias dilihat dengan mengubah kondisi seperti pada Gambar 21.



Gambar 21 Mengubah kondisi kontur tanggul setelah di running

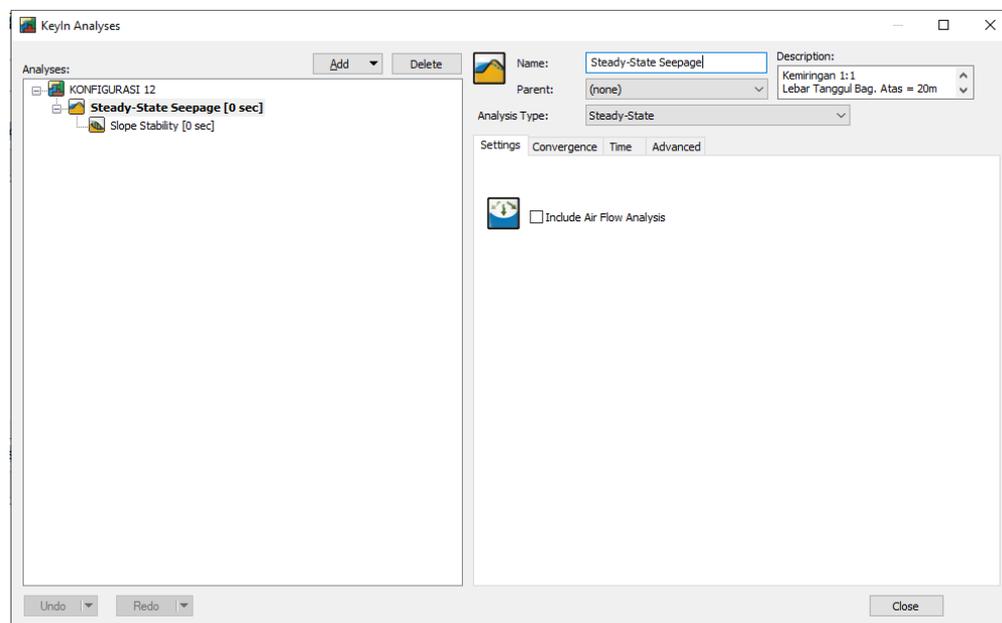


Gambar 22 Hasil running dengan kondisi Pore-Water Pressure

Lampiran 2

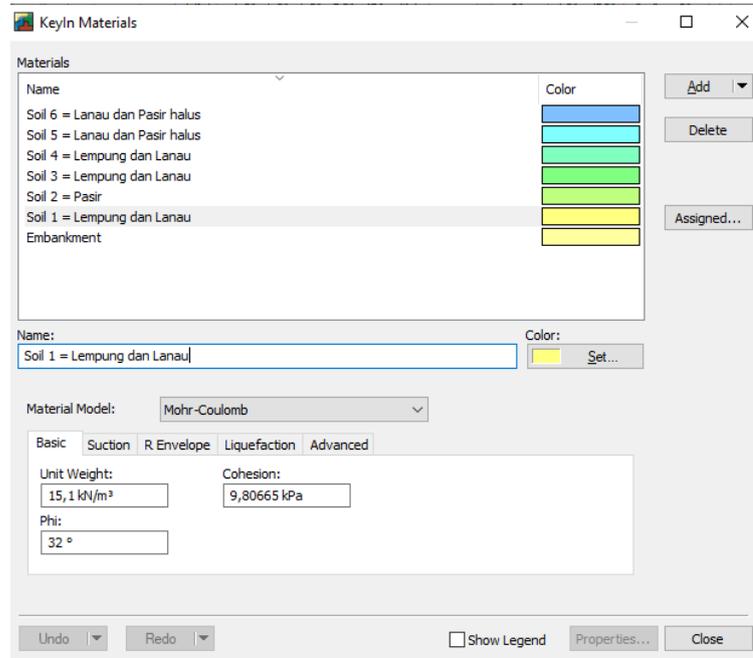
Berikut adalah langkah-langkah lanjutan dari Analisa laju rembesan (seepage) dilanjutkan ke analisa stabilitas lereng pada tubuh tanggul dengan Geo Studio SLOPE/W menggunakan nilai suction :

1. Untuk melanjutkan analisa dari SEEP/W kemudian beralih ke analisa SLOPE/W, lakukan hal-hal berikut :

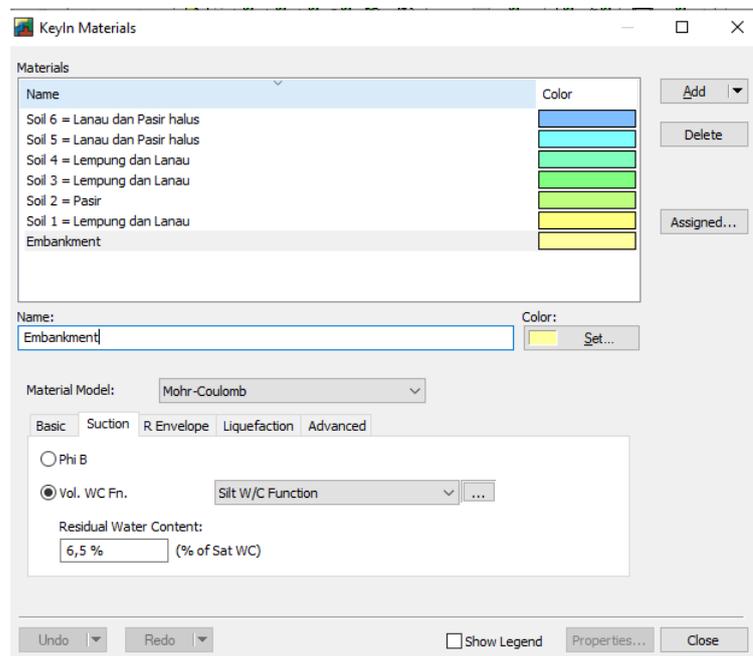


Gambar 1 Penentuan model analisis SLOPE/W

- Klik Define, kemudian klik KeyIn Analyses untuk memodelkan stabilitas lereng.
 - Klik Add pilih SLOPE/W, kemudian pilih Limit Equilibrium, lalu tutup untuk memulai.
2. Memasukkan data material
 - Setelah object tergambar, masukkan data material. Klik KeyIn > materials.
 - Nama material yang sudah dimasukkan pada saat di SEEP/W disesuaikan dengan material yang datanya akan dimasukkan.
 - Untuk tanah penyusun tanggul dan tanah dasar , menggunakan Mohr-Coulomb.
 - Nilai γ , c dan ϕ disesuaikan dengan data yang ada.
 - Untuk tanah penyusun tanggul, masukkan data suction dengan nilai Vol. Water Content dan Residual Water Content yang sudah dianalisa awal dengan SEEP/W.



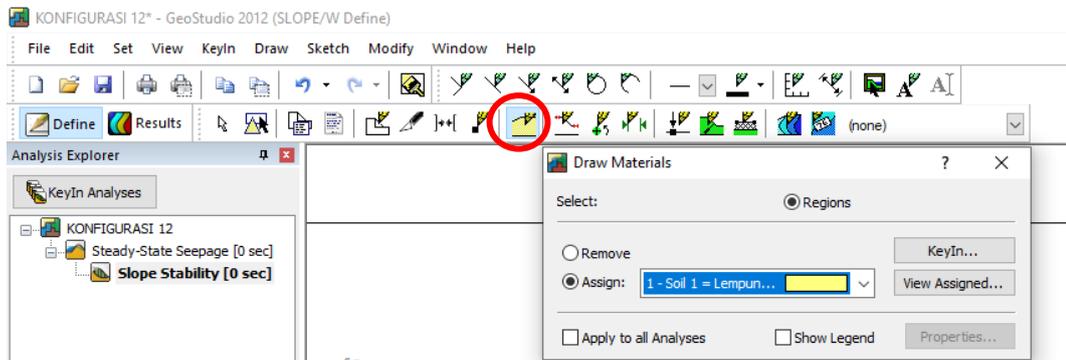
Gambar 2 Perencanaan material pada KeyIn Material



Gambar 3 Perencanaan material penyusun tanggul untuk nilai suction

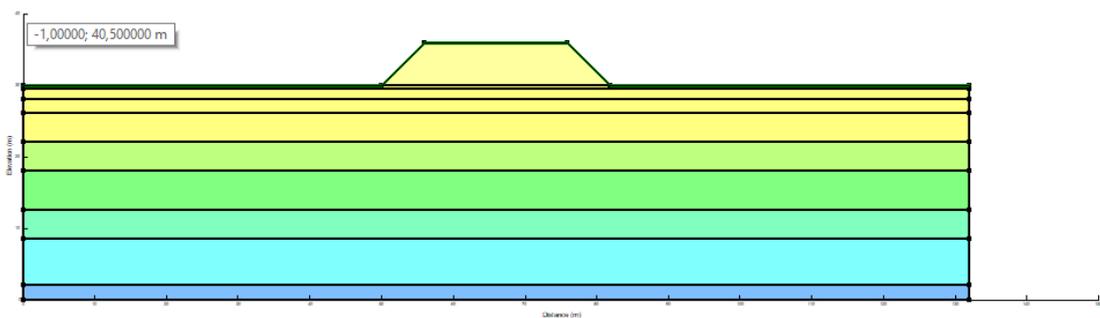
3. Material pada object

- Untuk menggambarkan material pada object yang sudah digambar, maka klik draw > materials > pilih material yang akan digambarkan > klik object. Atau bisa juga klik icon pada lingkaran merah.



Gambar 4 Menggambar material pada object

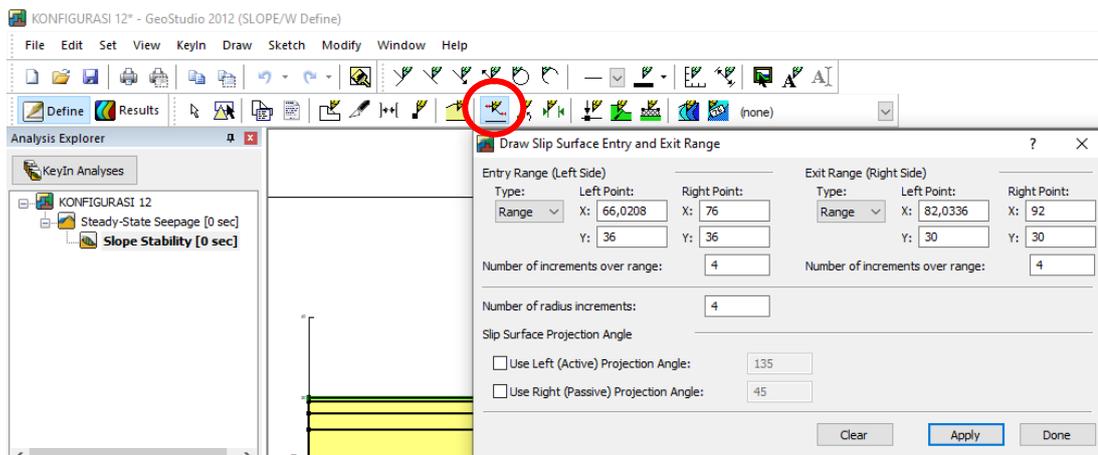
- Lakukan sampai tergambar semua material pada tanggul.



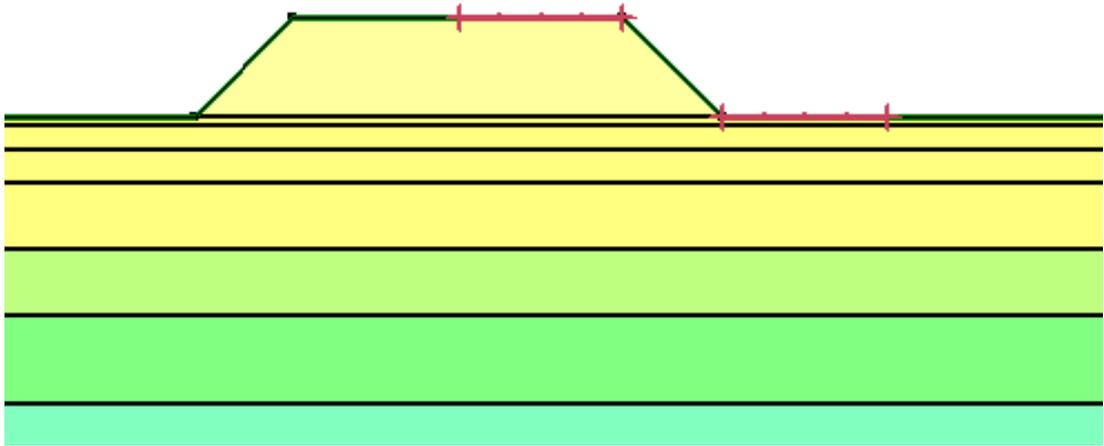
Gambar 5 Material sudah tergambar pada object

4. Membuat Entry dan Exit

- Klik KeyIn>Slip Surface>Entry dan Exit kemudian isi koordinat.

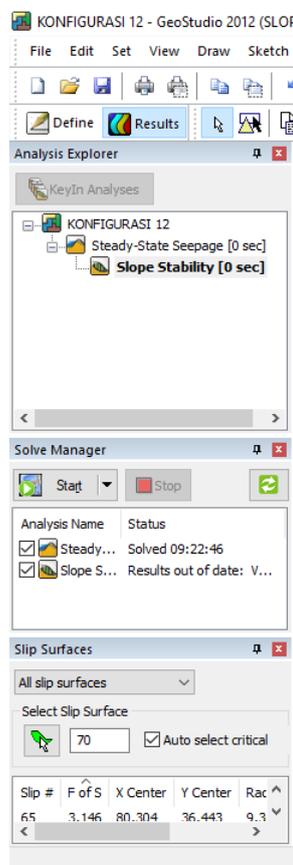


Gambar 6 Merencanakan Entry dan Exit pada object



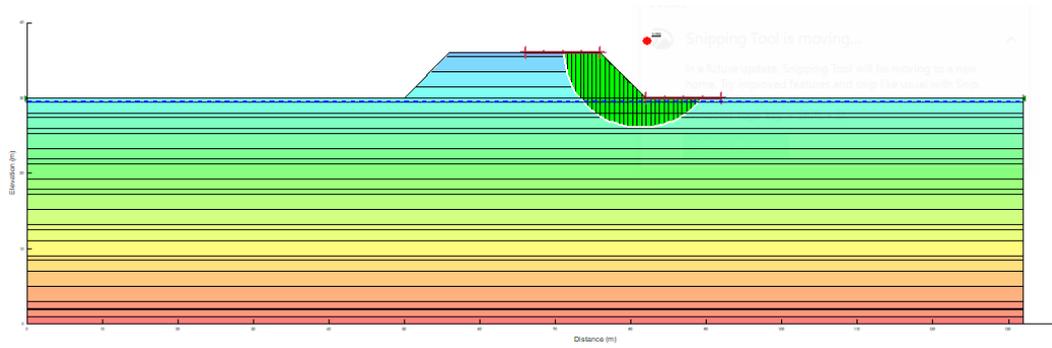
Gambar 7 Penggambaran Entry dan Exit pada object

5. Lakukan penyesuaian pada pemodelan yang lain sesuai dengan rencana slip surface (diatur pada Entry dan Exit). Selanjutnya, klik kotak pada Solve Manager > Start. GeoStudio SLOPE/W akan merunning hasil dari pemodelan yang telah dilakukan.

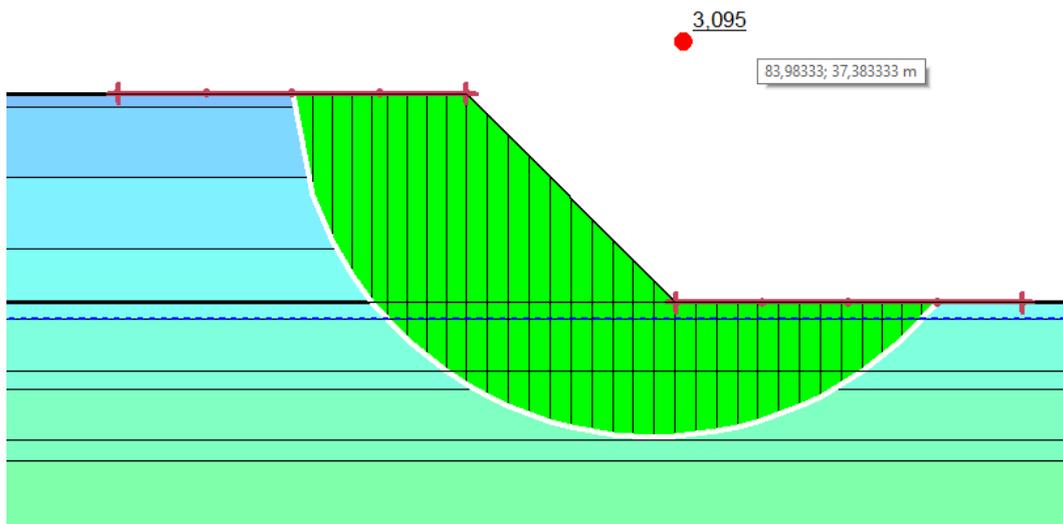


Gambar 8 Running Pemodelan

6. Setelah di run beberapa saat, akan muncul gambar seperti pada Gambar 31 dan Gambar 32. Pada hasil running dilihat nilai faktor keamanan serta kelongsoran kritis pada tanggul.



Gambar 9 Hasil running pada kondisi kelongsoran tanggul



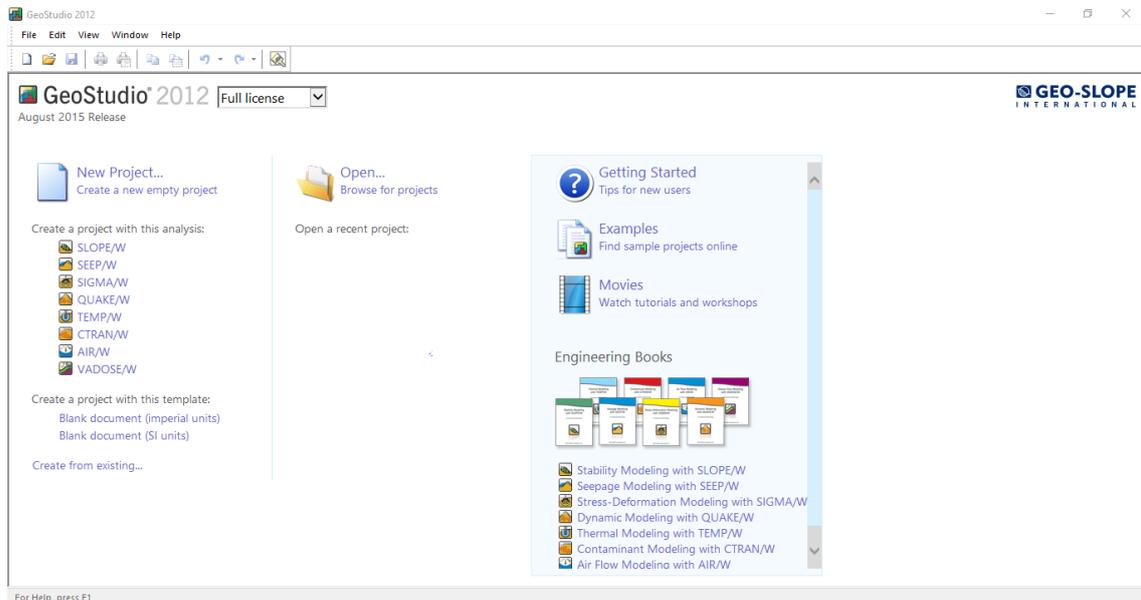
Gambar 10 Nilai faktor keamanan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 3

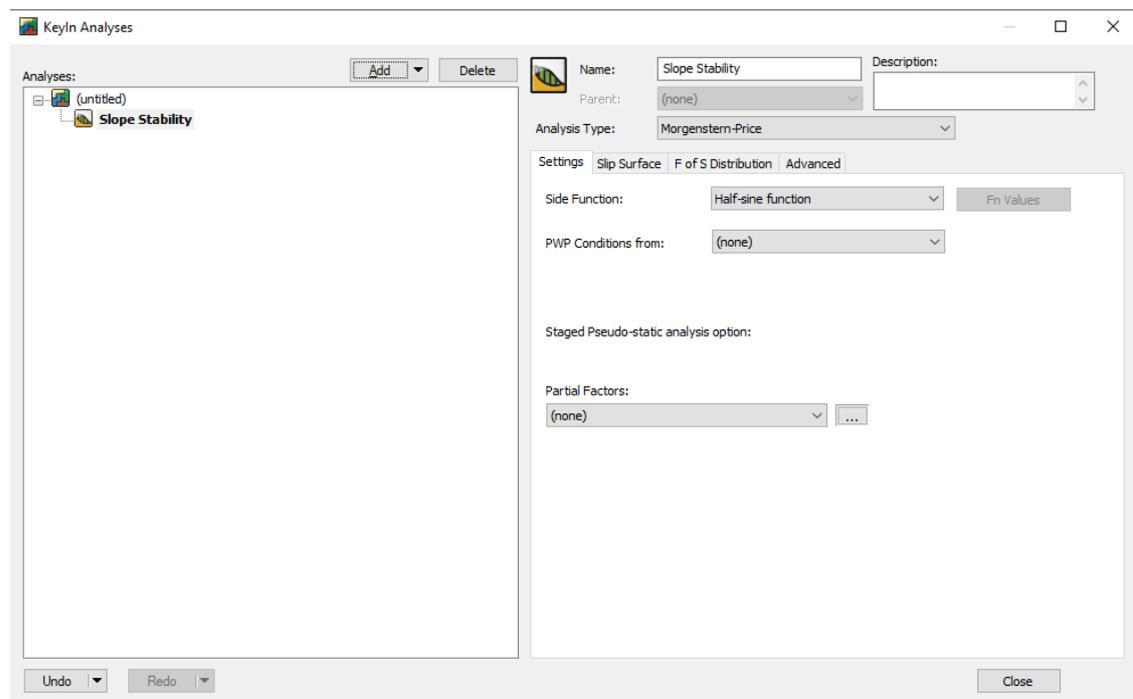
Berikut adalah langkah-langkah analisa stabilitas lereng pada tubuh tanggul dengan Geo Studio SLOPE/W tanpa menggunakan nilai suction :

1. Buka aplikasi GeoStudio



Gambar 1 Tampilan Awal GeoStudio

2. Untuk membuat project baru, lakukan hal-hal berikut :

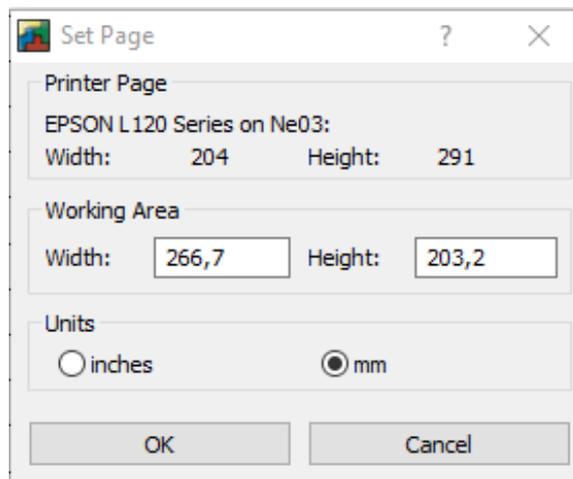


Gambar 2 Penentuan model analisis SLOPE/W

- Klik New, kemudian klik SLOPE/W untuk memodelkan stabilitas lereng.
- Ketik nama project di kolom title, kemudian pilih Limit Equilibrium, lalu tutup untuk memulai.

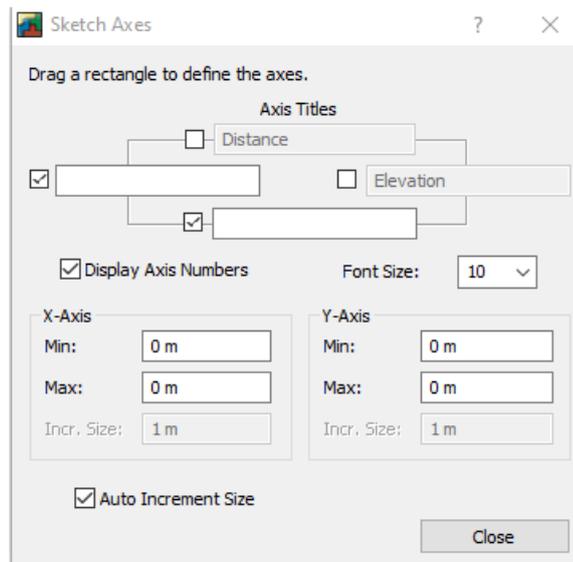
3. Mengatur lembar kerja

- Panjang dan lebar lembar kerja dapat diatur dengan klik set > page.



Gambar 3 Tampilan Set Page

- Untuk mendapatkan lembar kerja yang ideal, klik sketch > axes untuk mengatur sumbu x dan y, kemudian isi Batasan maksimal dan minimal.

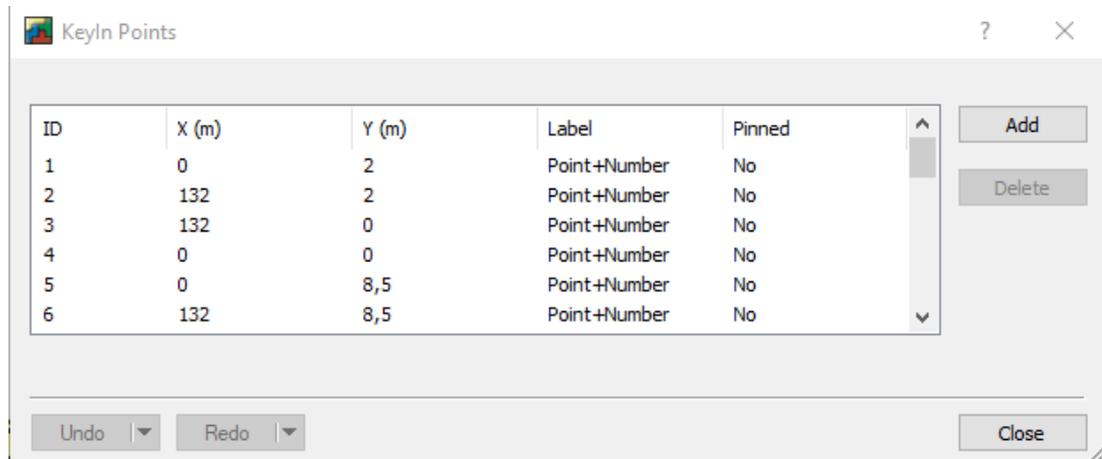


Gambar 4 Tampilan Sketch Axes

4. Menggambar object

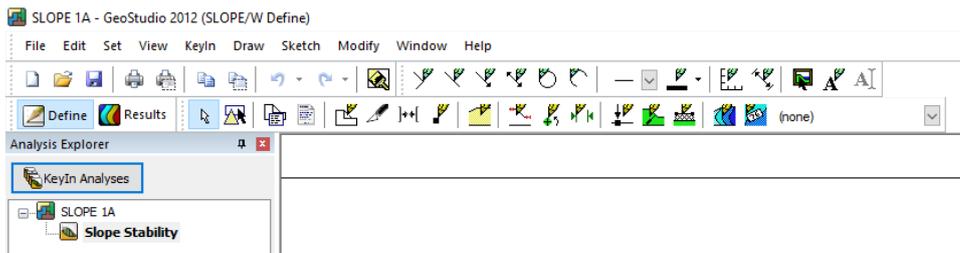
Object yang akan dimodelkan harus diketahui koordinatnya, sehingga dapat digambarkan dengan cara :

- Klik keyIn > Points, kemudian tulis semua koordinat yang menggambarkan object yang akan dimodelkan

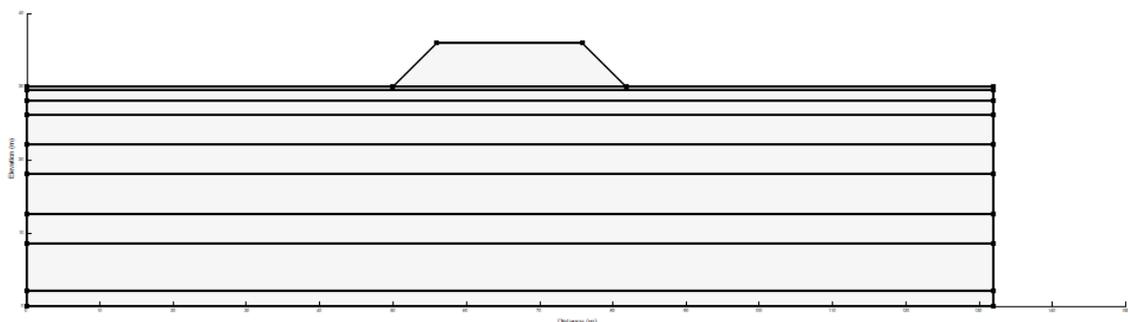


Gambar 5 Tampilan keyIn Points untuk menentukan titik rencana pemodelan

- Setelah semua titik tergambar, kemudian hubungkan tiap titik dengan klik draw > region atau klik icon pada lingkaran merah



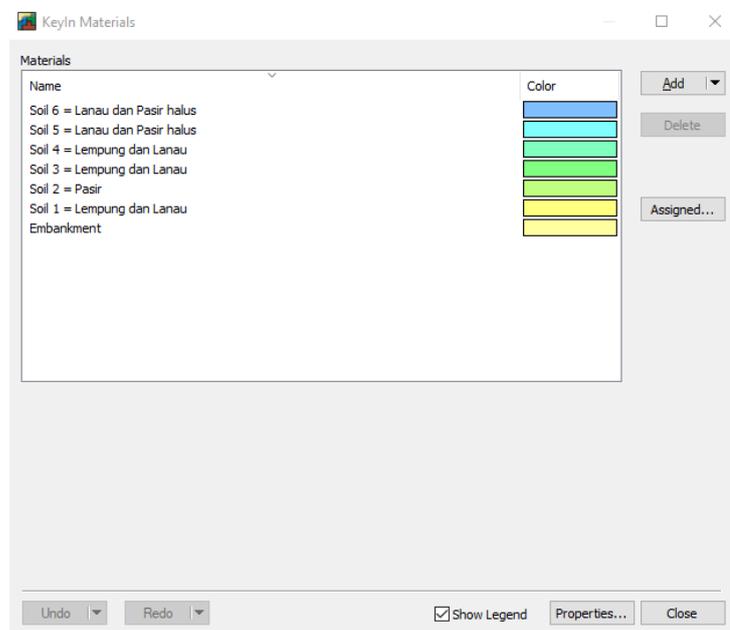
Gambar 6 Draw Region pada GeoStudio



Gambar 7 Hasil penggambaran region pada GeoStudio

5. Memasukkan data material

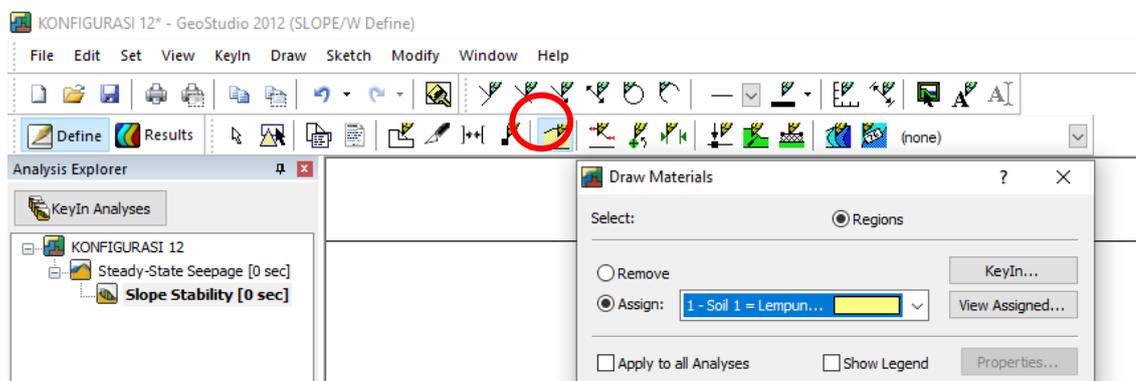
- Setelah object tergambar, masukkan data material. Klik KeyIn > materials.
- Nama material disesuaikan dengan material yang datanya akan dimasukkan.
- Untuk tanah penyusun tanggul dan tanah dasar , menggunakan Mohr-Coulomb.
- Nilai γ , c dan ϕ disesuaikan dengan data yang ada.



Gambar 8 Perencanaan material pada KeyIn Material

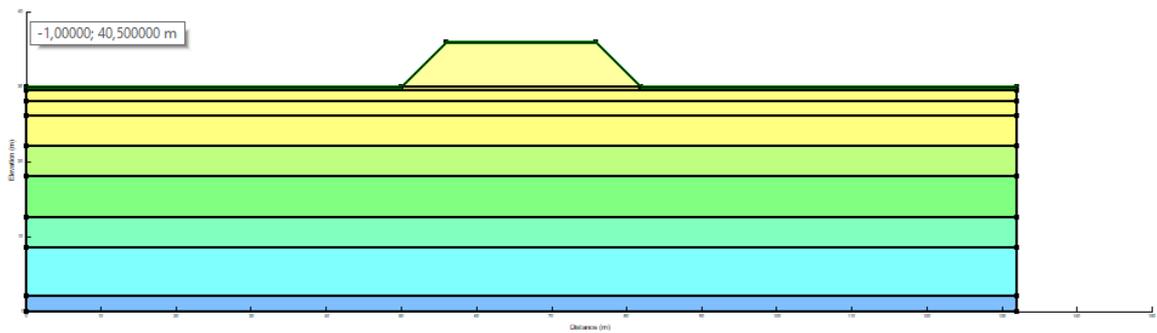
6. Material pada object

- Untuk menggambar material pada object yang sudah digambar, maka klik draw > materials > pilih material yang akan digambarkan > klik object. Atau bisa juga klik icon pada lingkaran merah.



Gambar 9 Menggambar material pada object

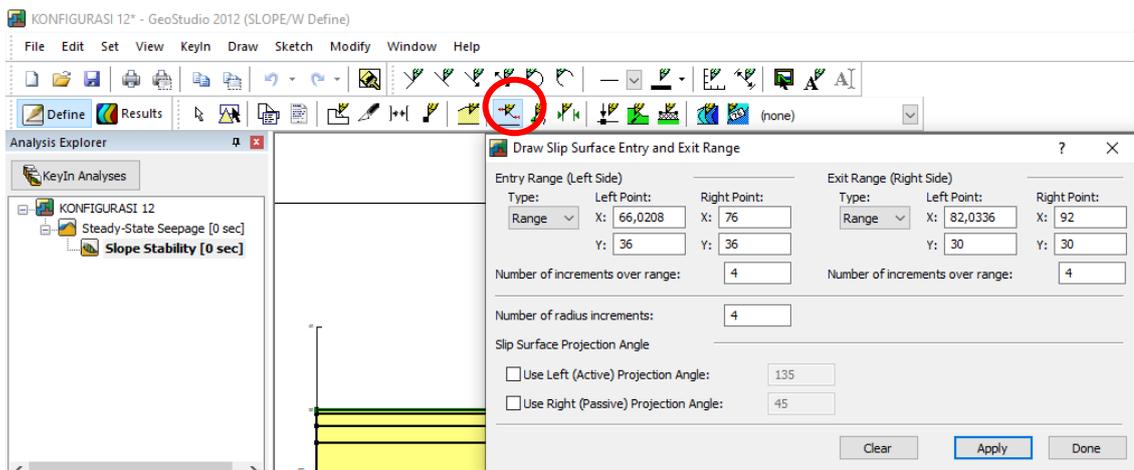
- Lakukan sampai tergambar semua material pada tanggul.



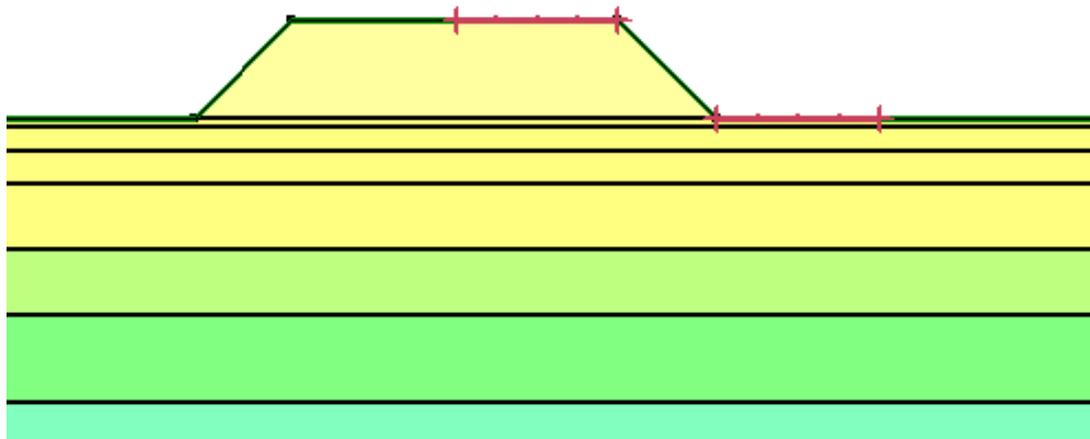
Gambar 23 Material sudah tergambar pada object

7. Membuat Entry dan Exit

- Klik KeyIn>Slip Surface>Entry dan Exit kemudian isi koordinat.

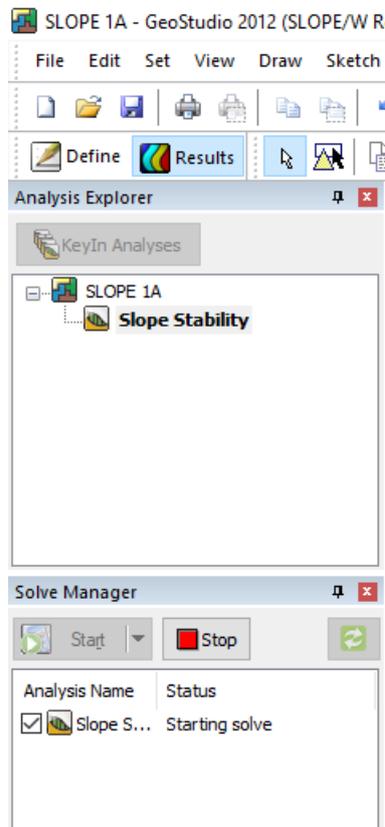


Gambar 24 Merencanakan Entry dan Exit pada object



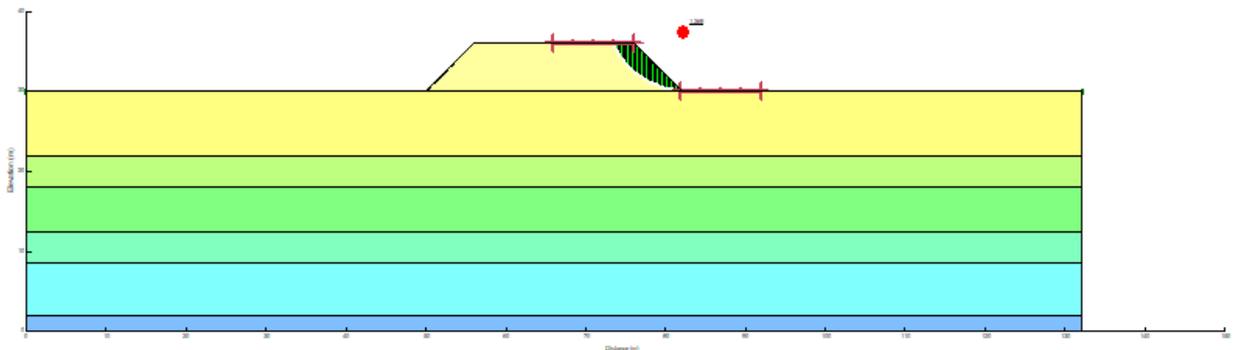
Gambar 12 Penggambaran Entry dan Exit pada object

- Lakukan penyesuaian pada pemodelan yang lain sesuai dengan rencana slip surface (diatur pada Entry dan Exit). Selanjutnya, klik kotak pada Solve Manager > Start. GeoStudio SLOPE/W akan merunning hasil dari pemodelan yang telah dilakukan.

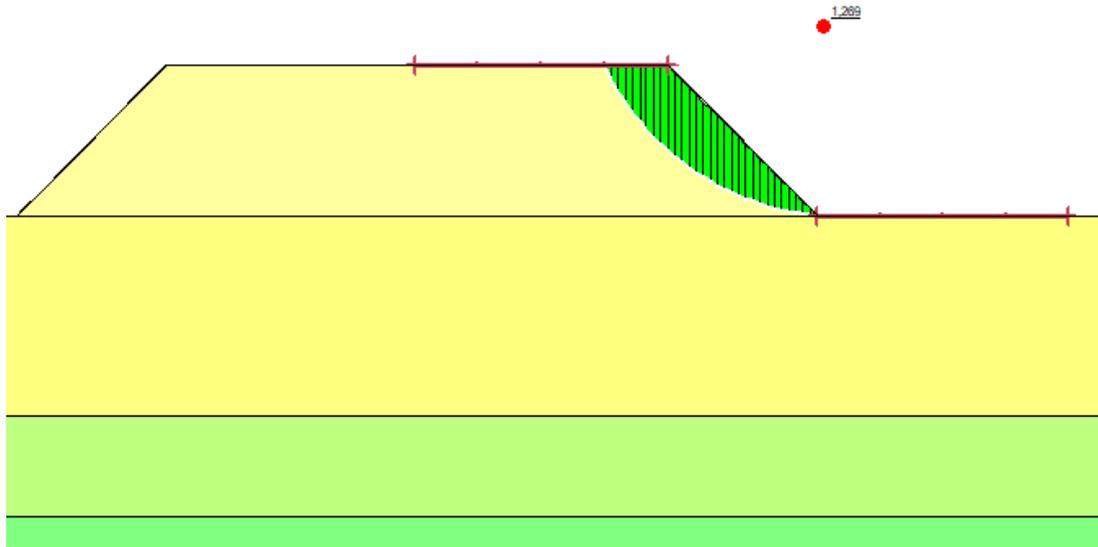


Gambar 13 Running Pemodelan

- Setelah di run beberapa saat, akan muncul gambar seperti pada Gambar 46 dan Gambar 47. Pada hasil running dilihat nilai faktor keamanan serta kelongsoran kritis pada tanggul.



Gambar 14 Hasil running pada kondisi kelongsoran tanggul



Gambar 15 Nilai faktor keamanan

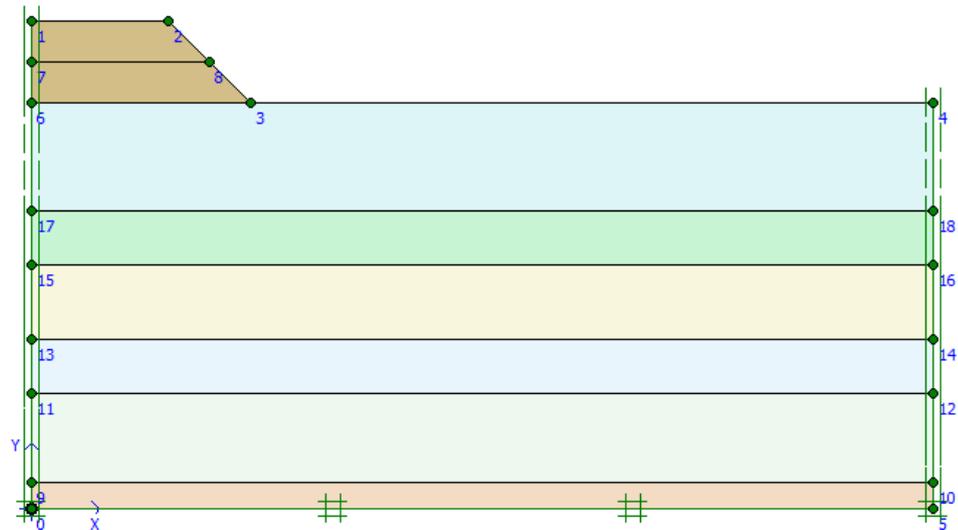
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 4

Berikut adalah langkah-langkah analisa penurunan tanggul dengan PLAXIS 2D :

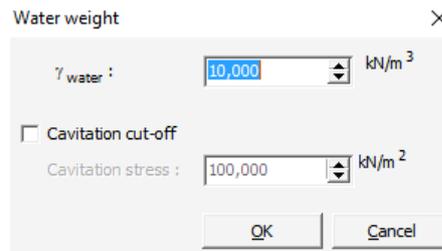
1. Geometry Model

- Pilih type analysis (Model) : Axysimetris dan Elements : 15-Node
- Gambarlah geometri Embankment sesuai gambar berikut ini



Gambar 1 Geometri Embankment

- Berilah Standart Fixities pada geometri model.
 - Isilah Material Sets sesuai yang dibutuhkan.
- ### 2. Material Sets and Mesh Generation
- Input data Material Sets sesuai yang dibutuhkan dengan cara Drag data tanah pada area gambar, kemudian klik OK.
 - Pilih Mesh dan klik Global Coarseness – medium
 - Klik Generate mesh, kemudian Update.
- ### 3. Initial Conditions
- Klik Initial Conditions, kemudian muncul nilai γ_{water} sebesar $10,000 \text{ kN/m}^3$, klik OK.



Gambar 2 Initial Conditions

- Pilih Closed Consolidation Boundary untuk menutup kedua sisi area gambar yang bertujuan agar air tidak dapat masuk, lakukan pada sisi kiri dari atas ke bawah serta lakukan pada sisi kanan dari atas ke bawah.
- Beri Phreatic level atau elevasi muka air tanah pada titik sesuai yang data.



- Klik "Initial Pore Pressures"

Non aktifkan tanah "Sand" pada timbunan 1 dan timbunan 2, kemudian kembali ke Initial Pore Pressures

- Klik Generate water pressure, pilih Phreatic level, dan Update



- Klik "Initial Pore Pressures"

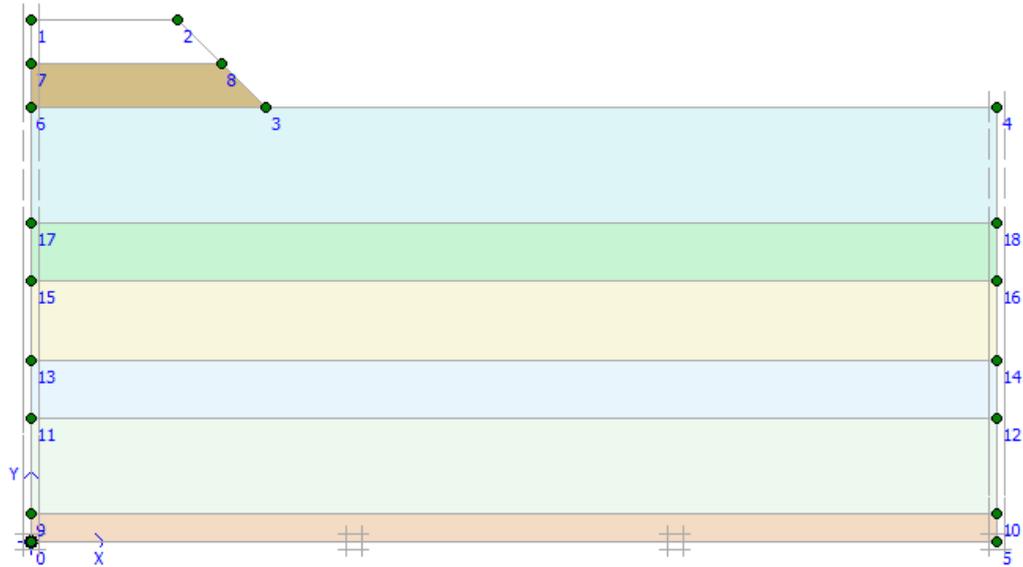


- Klik "Generate Initial Stresses", kemudian muncul nilai ΣM -weight = 1,000. Klik OK.

- Setelah diberi Generate Initial Stresses akan muncul gambar seperti dibawah ini, kemudian klik Update.

4. Calculations (**Penurunan**)

- Initial Phase
- Phase 1 "1. Timbunan 2m – 5day"
Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 5 day, klik Define
Klik timbunan 1, dan Update



Gambar 3 Timbunan tahap pertama

Next

- Phase 2 “2. Consolidation 200day”

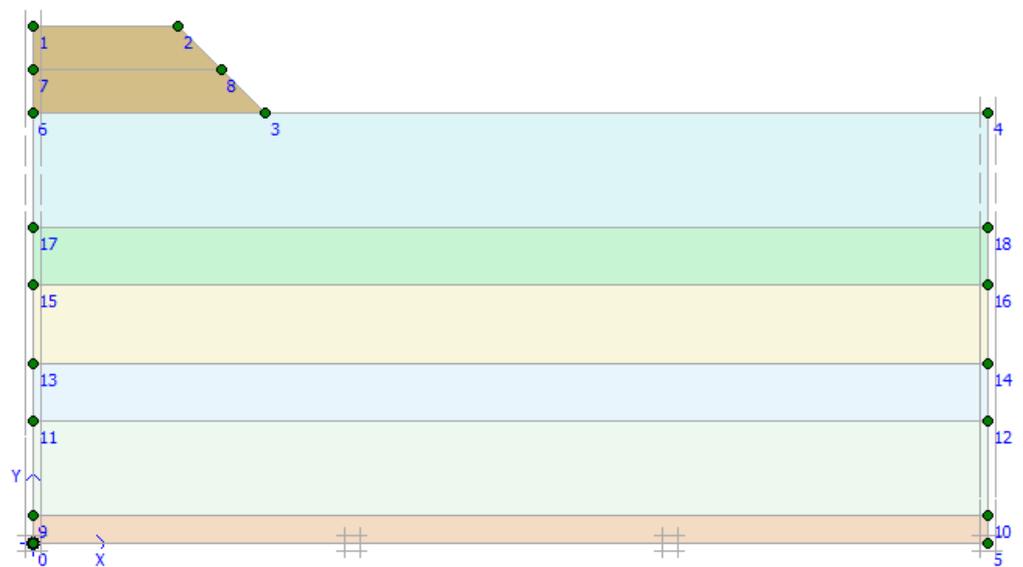
Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 200 day

Next

- Phase 3 “3. Timbunan 2m – 5day”

Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 5 day, klik Define

Klik timbunan 2, dan Update



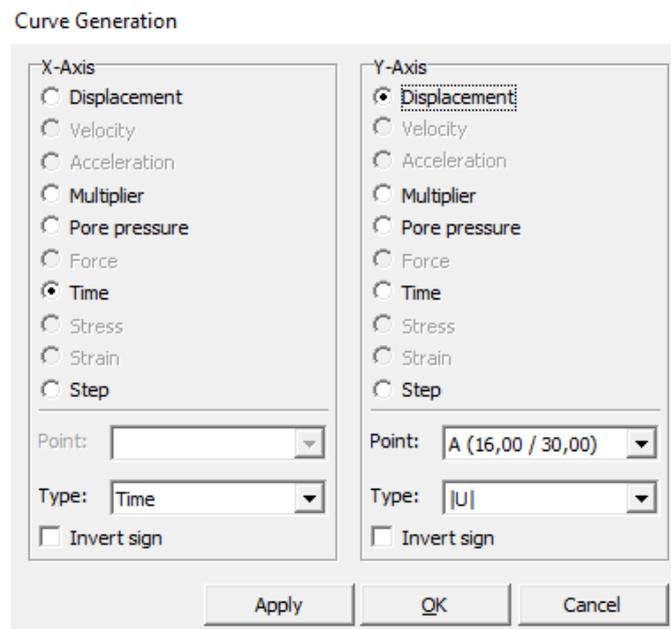
Gambar 4 Timbunan tahap kedua

Next

- Phase 4 “4. Consolidation till $p=1$ ”
Pilih Consolidation, kemudian Minimum Pore Pressure = $1,000 \text{ kN/m}^2$.
- Pilih point A dan B pada Road Embankment.
- Calculate

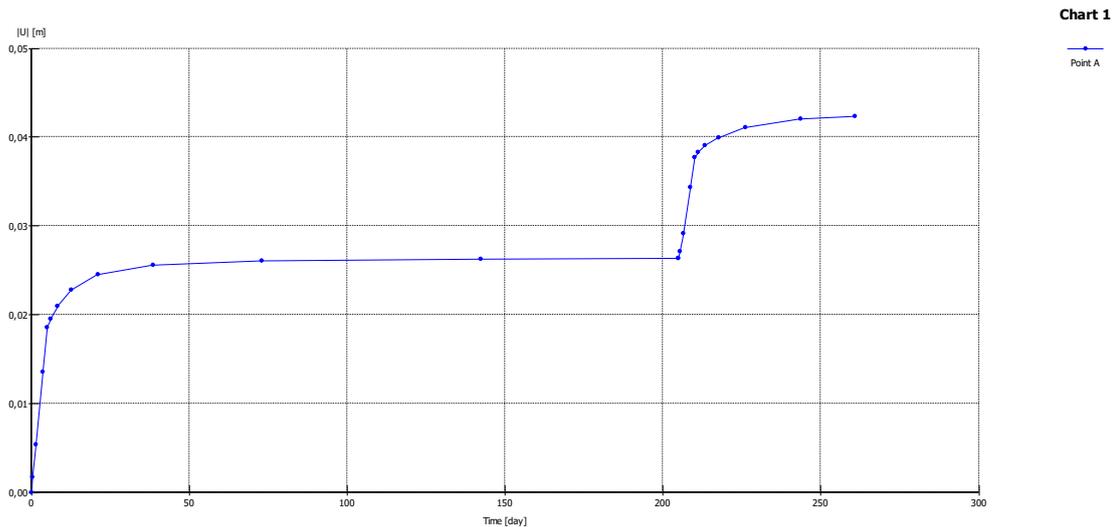
5. Generating a load –displacements curve

- Pilih Go to curves program, kemudian klik New chart, pilih project yang telah diberi nama atau disimpan “Lesson 2 Road Embankment”
- Pada curve generation,
X-axis untuk Time, dan Y-axis untuk Displacement
Ambil titik B
Kemudian klik OK.



Gambar 5 Curve Generation

6. Viewing Curve Result



Gambar 6 Hasil Kurva Penurunan vs Time

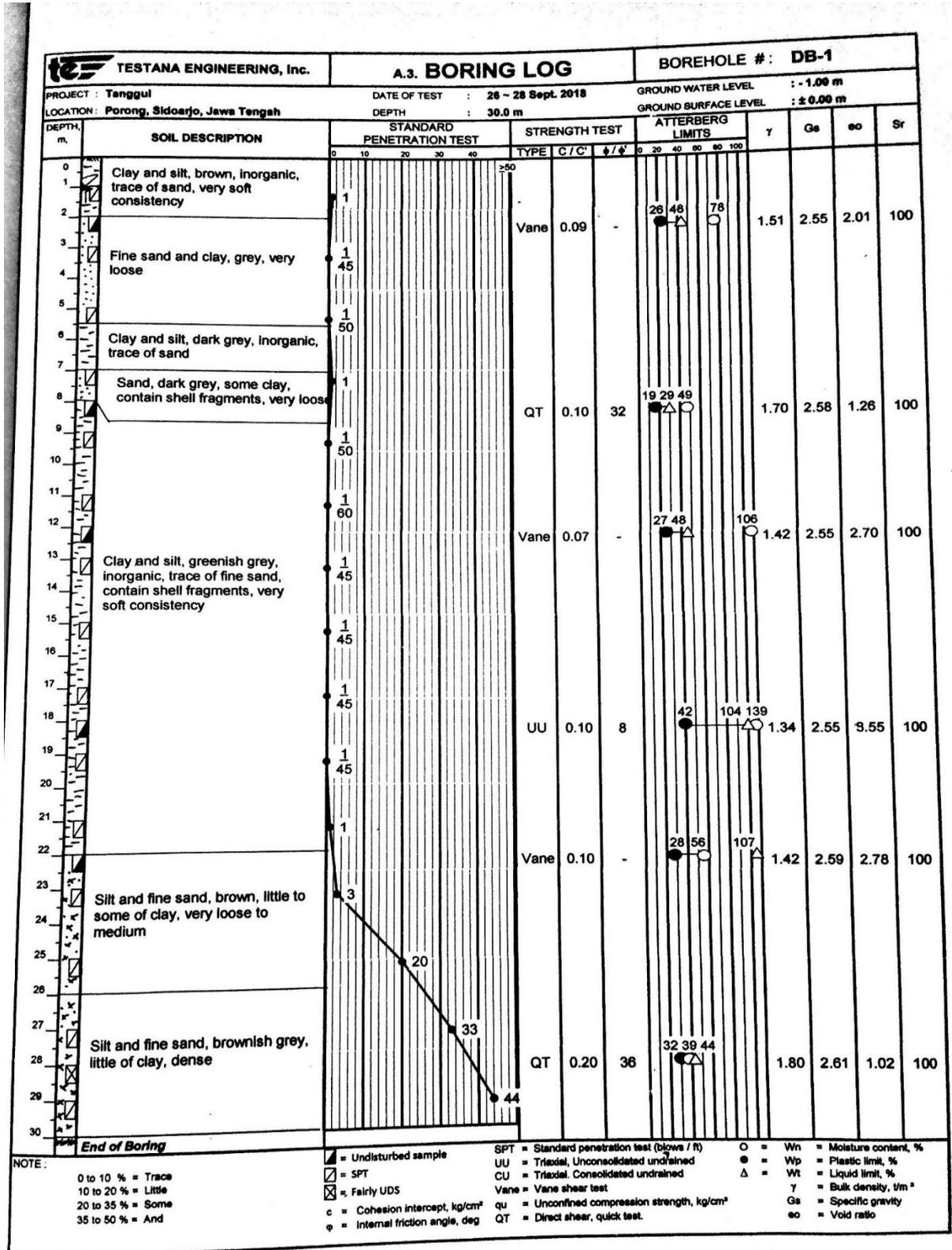
7. Calculations (Safety Analysis)

- Klik Go to Calculations program
- Phase 5 “Phi-c 2m”, pilih Phi/c-reduction, kemudian reset displacement to zero, Mulai dari Phase 1 “1. Timbunan 2m – 5day”, Next
- Phase 6 “Phi-c 4m”, pilih Phi/c-reduction, kemudian reset displacement to zero, Mulai dari Phase 3 “3. Timbunan 2m – 5day”, Next
- Phase 7 “Phi-c Consolidation”, pilih Phi/c-reduction, kemudian reset displacement to zero dan Ignore undrained behavior, Mulai dari Phase 4 “4. Consolidation till p=1”, Next
- Ambil 2 titik kembali
- Calculate

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 5

1. Data Boring Log DB-01



Sumber : Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kementrian PUPR (2018).

2. Koordinat Boring Log DB-01 ($7^{\circ}32'32.0''S$ $112^{\circ}42'29.5''E$)



Sumber : Google Maps, 2020.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy merupakan anak kedua dari empat bersaudara, Lahir di Surabaya pada tanggal 15 Juli 1996. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Manyar Sabrangan II Surabaya, lalu melanjutkan pendidikan di SMP 17 Agustus 1945 Surabaya, lalu di SMA 17 Agustus 1945 Surabaya. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2014, penulis diterima di Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Program Studi Diploma IV pada tahun 2014. Setelah menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan jenjang S2 pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 03111850010002. Di Jurusan Teknik Sipil, Penulis mengambil Bidang Studi Geoteknik. Penulis juga pernah aktif dalam beberapa kegiatan kemahasiswaan diantaranya : menjadi Staff Badan Semi Otonom Kewirausahaan di BEM FTSP ITS 2015/2016, menjadi Kepala Departemen Entrepreneur and Money Maker (EMM) di HMDS 2016/2017 dan berbagai kepanitiaan di beberapa kegiatan yang ada selama menjadi mahasiswa. Bagi pembaca yang ingin menghubungi penulis, bisa dihubungi via email dyahayurc7@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”