TESIS - RC 185401

PENGARUH *SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL YANG MENGGUNAKAN MATERIAL CAMPURAN LUMPUR SIDOARJO (LuSi) DAN TANAH LEMPUNG

INDRA RAHMA HARDIANA

NRP.03111850010003

DOSEN PEMBIMBING :

Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2020

TESIS – RC185401

PENGARUH *SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL YANG MENGGUNAKAN MATERIAL CAMPURAN LUMPUR SIDOARJO (LuSi) DAN TANAH LEMPUNG

INDRA RAHMA HARDIANA

NRP. 03111850010003

DOSEN PEMBIMBING:

Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng

Prof.Dr.Ir.Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN, DAN KEBUMIAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2020

THESIS – RC185401

THE EFFECT OF SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE (SWCC) ON EMBANKMENT MODELING USING MIXED MATERIAL OF SIDOARJO MUD (LuSi) AND CLAY

INDRA RAHMA HARDIANA

NRP. 03111850010003

SUPERVISOR :

Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng

Prof.Dr.Ir.Indarto, DEA

Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF CIVIL, PLANNING, AND GEO ENGINEERING

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

2020

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Oleh :
INDRA RAHMA HARDIANA
NRP: 03111850010003

Tanggal ujian : 26 Juni 2020
Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

1. Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M. Eng ……
   NIP: 19560119 198601 2 001
2. Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA ……
   NIP: 19501011 198203 1 002
3. Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, S.T., M.T. ……
   NIP: 19841010 200812 1 004

Penguji:

1. Prof. Ir. Noor Endah, M.Sc., Ph.D. ……
   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 Kebumian

Dr. Ir. Umboro Lasminto, ST., M.Sc.
NIP: 19721202 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: "**PENGARUH *SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL YANG MENGGUNAKAN MATERIAL CAMPURAN LUMPUR SIDOARJO (LUSI) DAN TANAH LEMPUNG**" ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulis untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah tesis 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, 24 Agustus 2020

METERAI TEMPEL
TGL. 20
75AHF408920086
6000
ENAM RIBU RUPIAH

INDRA RAHMA HARDIANA

NRP: 03111850010003

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

JUDUL ARTIKEL PUBLIKASI : "Pengaruh *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) Pada Pemodelan Tanggul Yang Menggunakan Material Campuran Lumpur Sidoarjo (LuSi) Dan Tanah Lempung"

PENULIS UTAMA : INDRA RAHMA HARDIANA

PENULIS ANGGOTA :

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

Artikel Publikasi tersebut merupakan sebagian atau keseluruan 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 mendapat sanksi akademik yang berlaku.

Surabaya, 24 Agustus 2020

METERAI TEMPEL
TGL. 20
AHF408920081
6000
ENAM RIBU RUPIAH

INDRA RAHMA HARDIANA

NRP: 03111850010003

PENGARUH *SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE* (SWCC) PADA PEMODELAN TANGGUL YANG MENGGUNAKAN MATERIAL CAMPURAN LUMPUR SIDOARJO (LuSi) DAN TANAH LEMPUNG

Mahasiswa Nama	: Indra Rahma Hardiana
Mahasiswa ID	: 03111850010003
Pembimbing	: Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng
Co-Supervisor	: Prof Dr.Ir Indarto, DEA
	Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST. MT

ABSTRAK

Badan Nasional Penanggulangan Bencana pada tahun 2016 menyatakan lebih dari 10 kali tanggul penahan lumpur Sidoarjo mengalami keruntuhan. Pada tahun 2018 PPLS telah melakukan penelitian tentang pemanfaatan campuran lumpur Sidoarjo dan tanah galian dari Gempol Pasuruan untuk material timbunan tanggul uji dengan hasil formula campuran optimal 70% lumpur Sidoarjo (LuSi) dengan 30% tanah galian.

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, terdapat retakan pada tanggul yang ditengarai sebagai akibat adanya perubahan karakteristik tanah saat terjadinya perubahan musim dan juga sebagai akibat dari campuran material kurang memenuhi persyaratan sebagai material timbunan. Perubahan musim dipengaruhi oleh nilai *suction*, sehingga pengaruhnya pada SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)* diteliti untuk mengetahui dampaknya terhadap kestabilan tanggul. Disisi lain, campuran LuSi dan tanah galian Pasuruan memiliki Indeks plastisitas tinggi di mana tidak sesuai dengan persyaratan material timbunan. Hal tersebut pula yang melatarbelakangi bahwa diperlukan data penelitian lain dengan material campuran LuSi dan tanah lempung yang memiliki indeks plastisitas rendah sebagai pembanding terpilihnya material yang memenuhi persyaratan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor keamanan dari beberapa konfigurasi geometri tanggul dengan variasi muka air tanah dan variasi endapan lumpur dengan mempertimbangkan pengaruh nilai suction pada SWCC. Selain itu juga penelitian ini bertujuan untuk mencari besarnya pemampatan segera dengan menggunakan program bantu PLAXIS. Di dalam penelitian ini dilakukan pemodelan program bantu dengan menggunakan program Geostudio. Data campuran material yang digunakan didapatkan dari data sekunder dimana terpilih prosentase campuran optimum yaitu 20% Lumpur Sidoarjo dan 80% tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya.

Hasil pemodelan program bantu Geostudio menunjukkan bahwa semakin rendah muka air tanah, maka nilai faktor keamanan mengalami peningkatan dan menyebabkan tanggul dalam kondisi aman. Hal tersebut dikarenakan nilai suction memberikan nilai besar yang membuat tegangan geser tanah menjadi lebih besar. Berdasarkan hasil pemodelan pada kondisi muka air tanah (M.A.T) 0 m dengan variasi tinggi timbunan mulai dari 3 – 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2

mendapatkan hasil rentang angka keamanan 1,7 – 3,4. Sedangkan untuk hasil pemodelan tanggul pada muka air tanah (M.A.T) - 30 m dengan variasi ketinggian yaitu 3 m, 5 m, dan 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2 menghasilkan rentang angka keamanan antara 2,4 – 4,6

Pemodelan pengaruh endapan lumpur menunjukkan hasil beberapa kondisi yaitu kondisi pada saat endapan lumpur rendah (1 m) mendapatkan rentang angka keamanan yaitu 1,8 – 3,5 untuk ketinggian timbunan mulai dari 3 m – 7 m dan kemiringan tanggul 1:1. Kondisi lainnya pada endapan lumpur tinggi (3 m) menghasilkan rentang angka keamanan yaitu 2,5 – 7,0 untuk ketinggian timbunan mulai dari 3 m – 7 m dan kemiringan tanggul 1:1.

Besar pemampatan segera (*Immediate Settlement)* pada campuran optimum LuSi dan tanah lempung dengan nilai pemampatan yaitu rentang antara 2-10 cm per 200 hari untuk geometri ketinggian 3 m, 5, dan 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2. Pemampatan segera (*Immediate Settlement)* yang terjadi pada kemiringan 1:1 didapatkan hasil pemampatan segera jauh lebih besar dibandingkan dengan pemampatan 1:2 dan pemampatan segera dengan ketinggian tanggul semakin tinggi maka pemampatan semakin besar.

Kata kunci : Lumpur Sidoarjo, SWCC, *Suction,* Kestabilan Tanggul, Geoslope, Endapan Lumpur Sidoarjo, Pengaruh Muka Air Tanah

THE EFFECT OF SOIL WATER CHARACTERISTIC CURVE (SWCC) ON EMBANKMENT MODELING USING MIXED MATERIAL OF SIDOARJO MUD (LuSi) AND CLAY

Student's Name : Indra Rahma Hardiana
Student Identity Number : 03111850010003
Supervisor : Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M. Eng
Co-Supervisor : Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA
Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST. MT

ABSTRACT

In 2016, National Disaster Management Authority stated that more than 10 times Sidoarjo mud embankment had collapsed. In 2018, PPLS had conducted research on the mixtures utilization of Sidoarjo mud and excavated soil from Gempol Pasuruan for embankment material test. Its result formula contained of optimal mixture of 70% Sidoarjo mud (LuSi) and 30% excavated soil.

Based on the observation made, there were cracks in signed embankment as the result of soil characteristic changes during seasonal changes as well as the result of material mixture which did not meet the requirement as stockpile materials. Seasonal changes influenced by suction value, hence its effect on SWCC (Soil-Water Characteristic Curve) was studied to determine its impact on embankment stability. On the other hand, the mixture of LuSi and Pasuruan excavated soil had high plasticity index in which it did not match the embankment material requirements. Thus, it was needed another research data on the mixture of LuSi and clay which had low plasticity index as a comparison for selected material met the requirement.

The purpose of this study was to determine the safety factor from several embankment geometric configurations. It had groundwater level variations and sludge variation. It also considered the effect of suction value on SWCC. In addition, this research also had the purpose to find out the amount of immediate settlement using PLAXIS program. In this research, it was conducted an assisted program modeling using Geostudio program. Mixture material data used was obtained from secondary data. It was selected on the optimum mixture of 20% Sidoarjo mud and 80% clay from Kertajaya Indah, Surabaya.

The modeling result of Geostudio assisted program indicated that the lower groundwater level, hence safety factor value had increased and made the embankment in safe condition. It was due to the suction value provided high value which made soil shear stress bigger. Based on modeling result on groundwater level (M.A.T) 0 m and its variation of heap height ranging from 3-7 m and slopes 1:1, 1:1.5 and 1:2, it was obtained the result of safety number ranging on 1.7-3.4 . On the other hand, the modeling result of embankment on groundwater level (M.A.T) – 30 and its height variation of 3m, 5m, and 7m and slopes of 1:1, 1:1.5, and 1:2 obtained the safety number ranging on 2.4-4.6.

Modeling of mud sedimentation effect shown the result of some conditions, that is low sludge condition (1m) obtained safety number ranging on

1.8-3.5 for high embankment on 3m-7m and slopes of 1:1. Another condition was high sludge condition (3m) which obtained safety number ranging on 2.5-7.0 for high embankment on 3m-7m and slopes of 1:1.

Immediate settlement on optimum mixture of LuSi and clay which had compression value ranging on 2-10cm per 200 days for height geometric of 3m, 5m, and 7m and slopes of 1:1, 1:1.5, and 1:2. On immediate settlement occurred on slopes of 1:1, it obtained bigger immediate settlement compared to 1:2 settlements. Immediate settlement which had high embankment hence its settlement will be greater.

Keywords: Sidoarjo mud, SWCC, Suction, Embankment stability, Geoslope, Sidoarjo Mud Sediment, Groundwater level effect

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan rahmat dan kesempatan yang telah dilimpahkan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul **"Pengaruh *Soil Water Characteristic Curve* (Swcc) pada Pemodelan Tanggul yang Menggunakan Material Material Campuran Lumpur Sidoarjo (Lusi) dan Tanah Lempung**". 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,hidayah serta anugerah-Nya.
2. Kedua orang tua saya yang selalu mendoakan, mendukung, dan memberikan terbaik untuk saya.
3. Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng dan Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA dan Dr. Trihanyndio Rendy Satrya, ST. MT selaku dosen konsultasi yang telah memberikan arahan serta bimbingannya dengan sebaik-baiknya dalam proses penyusunan Tesis ini.
4. Dosen-Dosen bidang Geoteknik ITS yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan mengenai geoteknik sehingga menunjang penyusunan Tesis ini.
5. Teman-teman saya, Nur Riska Amalia Putri, Muhammad Agung Bimantara dan semua pihak yang telah membantu dan mendukung penyusunan Tesis ini.

Dalam pembuatan Tesis ini, penulis menyadari bahwa Tesis yang penulis buat masih sangat jauh dari kesempurnaan. Jadi dengan rasa hormat mohon petunjuk, saran, dan kritik terhadap Tesis ini, sehingga kedepannya diharapkan ada perbaikan terhadap Tesis ini serta dapat menambah pengetahuan bagi penulis.

Surabaya, Agustus 2020

Indra Rahma Hardiana

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS ..... **vii**
PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI TESIS ..... **viii**
ABSTRAK ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xiii**
DAFTAR ISI ..... **xv**
DAFTAR GAMBAR ..... **xix**
DAFTAR TABEL ..... **xxi**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang **1**
1.2. Rumusan Masalah **4**
1.3. Tujuan Penelitian **5**
1.4. Manfaat Penelitian **5**
1.5. Batasan Masalah **5**
1.6. Lokasi Penelitian **6**
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA **7**
2.1. Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (LuSi) **7**
2.1.1. Kandungan Lumpur Sidoarjo 9
2.1.2. Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo 12
2.2. Pencampuran Material Lumpur Sidoarjo (LuSi) dan Tanah Lempung Kertajaya Indah Timur Surabaya **13**
2.2.1. Nilai Spesifikasi Timbunan Biasa dengan SNI pada Campuran LuSi dan Tanah Lempung 14
2.3. Nilai *Suction* pada SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)* **15**
2.3.1. Total *Suction* 16
2.3.2. Data SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)* Campuran LuSi dan Tanah Lempung 19
2.4. Stabilitas Lereng **20**

2.4.1. Longsoran *(Sliding)* 22
2.4.2. Pengaruh Perubahan Muka Air Tanah terhadap Kestabilan Lereng 25
2.4.3. Analisa Stabilitas Lereng dengan Metode *Morgenstern – Price (MP)* 28
2.5. Penurunan Segera (*Immediate Settlement*) pada Timbunan 29
2.5.1. Penurunan pada Timbunan 30
2.6. Program Bantu 31
2.6.1. Program Geostudio 31
2.6.2. Program *PLAXIS* 33
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 35
3.1. Uraian Umum **35**
3.2. Bagan Alir Penelitian **36**
3.3. Prosedur Penelitian **38**
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 45
4.1. Penentuan Prosentase Campuran Optimum dari Data Sekunder 45
4.1.1. Pemeriksaan Nilai Spesifikasi Timbunan Biasa dengan SNI pada Campuran LuSi dan Tanah Lempung 46
4.2. Penentuan SWCC (*Soil Water Characteristic Curve)* dari Data Sekunder 47
4.2.1. Pemetaan Data Sekunder terhadap *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) 47
4.3. Penerapan SWCC *(Validasi Suction*) dengan Program Geostudio pada Pemodelan Tanggul 49
4.4. Stabilitas Tanggul 54
4.4.1. Data Sekunder Tanah Dasar 55
4.4.2. Data Material Campuran LuSi dan Tanah Lempung, Kertajaya untuk Pemodelan Timbunan 57
4.4.3. Pemodelan Variasi Muka Air Tanah (Campuran Lusi Dan Tanah Lempung, Kertajaya Indah) 58
4.4.4. Pemodelan Variasi Endapan Lumpur (Campuran LuSi dan Tanah Lempung, Kertajaya Indah) 66

4.4.5. Pengaruh Nilai Suction terhadap Faktor Keamanan Tanggul ...71
4.5. Penurunan tanah *Immediate Settlement* (Penurunan Seketika)....72
4.5.1. Data Material untuk pemodelan *PLAXIS*.....74
4.5.2. Analisa Pemampatan Segera (*Immediate settlement)* Tanggul..75
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 77
5.1. Kesimpulan.....77
5.2. Saran.....78
DAFTAR PUSTAKA i
I. Pemodelan dengan *GeoStudio*..... iii
II. Pemodelan dengan *PLAXIS*..... iii
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

"Halaman Ini Sengaja Dikosongkan"

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Peta Sebaran Lumpur Sidoarjo 1

Gambar 1. 2 Tanggul Uji..... 2

Gambar 1. 3 Gambar a) Retakan Sisi-Sisi Tanggul b) Gambar Retakan Tengah Tanggul..... 3

Gambar 2. 1 Kondisi Lumpur Sidoarjo (Dokumentasi Penulis, 2018) 9

Gambar 2. 2 Hubungan Antara Berat Volume Kering dan Lumpur Lapindo (Gati Sri Utami, 2015)..... 13

Gambar 2. 3 Pengaruh tegangan eksternal dan suction terhadap tekanan antar butiran tanah (WW.Ng dkk, 2007) 17

Gambar 2. 4 Kurva drainase dua jenis bahan kapur (*Corney* dan *Coleman* 1954)..... 18

Gambar 2. 5 Kurva drainase dua jenis bahan kapur (Corney dan Coleman 1954) yang telah dikalibrasi 19

Gambar 2. 6 Data SWCC Tanah Pantai Dalam (M.Yusof, 2016) 19

Gambar 2. 7 Bentuk – Bentuk Bidang Longsor (Hardiyatmo, 2010) 21

Gambar 2. 8 Letak Bidang Gelincir (Sri Utami, 2014)..... 24

Gambar 2. 9 Nilai FS akibat perubahan muka air tanah bawah lereng lempung sedang (I G. N. Wardana, 2011)..... 25

Gambar 2.10 Perbandingan nilai FS dan kemiringan lereng (Modifikasi Nurhidayat dkk., 2016)..... 27

Gambar 2. 11 Perubahan faktor aman lereng terhadap waktu 29

Gambar 2. 12 Analisa Besar Penurunan (Juan Arden Lacando, 2015)..... 30

Gambar 3. 1 Bagan Alir 36

Gambar 3. 2 Bagan Alir(Lanjutan) 37

Gambar 3. 3 Hubungan Indeks Plastistas dan Sudut Geser 39

Gambar 3. 4 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)..... 41

Gambar 3. 5 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum dengan Variasi Endapan Lumpur 42
Gambar 4. 1 SWCC dari Tanah Pulau Dalam……..52
Gambar 4. 2 Penampang Hasil Ouput SEEP/W untuk Nilai Suction……..53
Gambar 4. 3 Potongan Hasil Ouput (Letak Suction)……...54
Gambar 4. 4 Geometri Pemodelan Tanggul…… 55
Gambar 4. 5 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)…….. 58
Gambar 4. 6 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan……61
Gambar 4. 7 Hasil Pemodelan SLOPE/W Tinggi 7 meter dan Kemiringan 1:1……61
Gambar 4. 8 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)……63
Gambar 4. 9 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan……65
Gambar 4. 10 Hasil Pemodelan SLOPE/W Tinggi 7 meter dan Kemiringan 1:1……65
Gambar 4. 11 Variasi Endapan Lumpur 1 m dan Ketinggian Tanggul 5 Meter……67
Gambar 4. 12 Variasi Endapan Lumpur 1 m dan Ketinggian Tanggul 5 Meter……68
Gambar 4. 13 Geometri Pemodelan dengan Endapan Lumpur Ketinggian 7 Meter……68
Gambar 4. 14 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan……70
Gambar 4. 15 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan SLOPE/W dan PLAXIS 2D……..72
Gambar 4. 16 Pemodelan PLAXIS……73
Gambar 4. 17 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Nilai Faktor Keamanan……76

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Hasil Pengujian Batas- Batas *Atteberg* Lumpur Sidoarjo 2

Tabel 1. 2 Sifat Fisis Tanah Galian Pasuruan 3

Tabel 2. 1 Kandungan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Ukuran Butiran.....8

Tabel 2. 2 Parameter Hasil Pengujian Sifat Fisik Lusi 10

Tabel 2. 3 Hasil Pengujian Toksikologis Lumpur Sidoarjo 11

Tabel 2. 4 Hasil Pengujian Mineral Lumpur Sidoarjo 12

Tabel 2. 5 Prosentase Peningkatan Berat Volume Kering 14

Tabel 2. 6 SWCC Plot Data Pantai Dalam..... 20

Tabel 2. 7 Hubungan Nilai Faktor Keamanan Lereng dan Intensitas Longsor 21

Tabel 2. 8 Litologi Batuan Bawah Permukaan Pada Lintasan Pertama..... 23

Tabel 2. 9 Hubungan Antara Beban, Faktor Keamanan dan Penurunan pada Muka Air Tanah 3 m (Tanah Lapangan)..... 31

Tabel 3. 1 Koefisien Rembesan (k) Berdasarkan Tipe Tanah..... 38

Tabel 3. 2 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah 39

Tabel 3. 3 Hubungan Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah 40

Tabel 4. 1 Prosentase Penurunan Nilai Liquid Limit (LL) 45

Tabel 4. 2 Prosentase Penurunan Nilai Indeks Plastisitas(IP)..... 46

Tabel 4. 3 Penentuan Spesifikasi Jenis Timbunan 47

Tabel 4. 4 Hasil Pemetaan Parameter Fisik dan Klasifikasi Tanah terhadap *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)..... 48

Tabel 4. 5 Input Data Tanah Dasar untuk Pemodelan SEEP/W 50

Tabel 4. 6 Input Data Timbunan untuk *Volume Water Content* Pada Pemodelan SEEP/W..... 51

Tabel 4. 7 Input Data Timbunan Estimate *Hydraulic Conductivity Function* untuk Pemodelan SEEP/W..... 51

Tabel 4. 8 Data Tanah Dasar Timbunan 56

Tabel 4. 9 Rekapitulasi Data Campuran Optimum 57

Tabel 4. 10 Data Parameter Tanah Tanggul..... 59

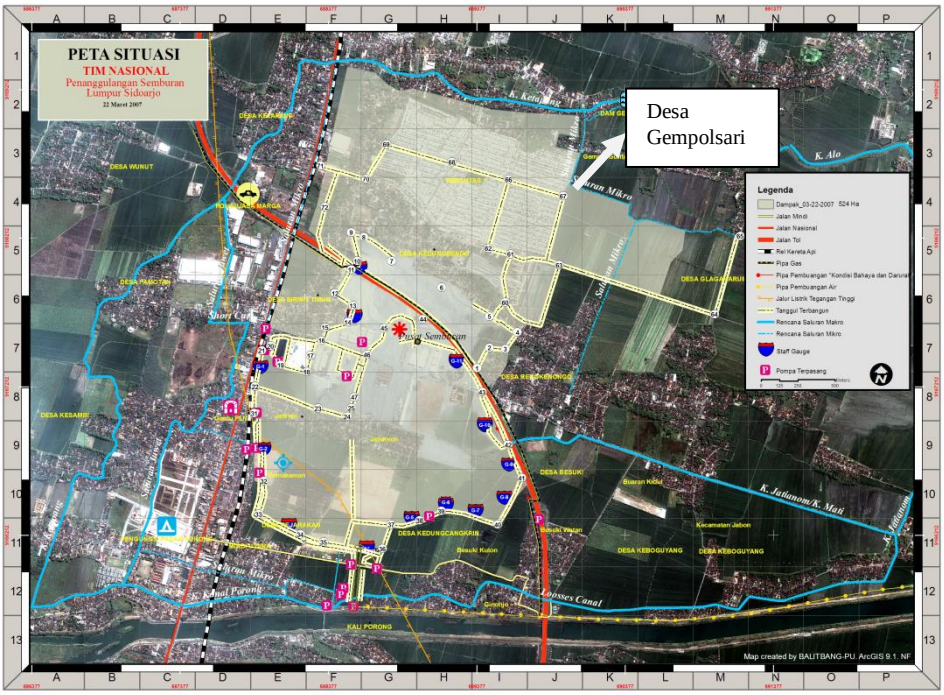
Tabel 4. 11 Hasil Pemodelan untuk Campuran Optimum M.A.T 0 Meter 60

Tabel 4. 12 Hasil Pemodelan untuk Campuran LuSi dan Tanah Lempung M.A.T -30 Meter 64
Tabel 4. 13 Analisa Faktor Keamanan Tanggul dengan Endapan Lumpur 69
Tabel 4. 14 Hasil Pemodelan untuk Campuran Optimum 71
Tabel 4. 15 Data Parameter Tanah Timbunan 74
Tabel 4. 16 Data Parameter Tanah Dasar 75
Tabel 4. 17 Hasil Pemodelan untuk Pemampatan Segera (*Immediate settlement)* 75

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bencana Lumpur panas Sidoarjo adalah peristiwa menyemburnya lumpur panas di lokasi pengeboran Lapindo Brantas *Inc* di dusun Balongnongo, Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia. Sejak tanggal 29 Mei 2006 sampai saat ini lebih dari 10 kali tanggul penahan luapan Lumpur Sidoarjo runtuh. Badan Nasional Penanggulangan Bencana pada tahun 2016 menyatakan bahwa tanggul lumpur Sidoarjo yang runtuh berada di Desa Gempolsari, Kecamatan Tanggulangin, Kabupaten Sidoarjo, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Peta Sebaran Lumpur Sidoarjo (Balitbang PU, 2018)

Untuk menanggulangi permasalahan tanggul yang runtuh dan mencegah luapan semburan LuSi yang meluas, maka sebagai solusi PPLS membuat tanggul baru yang lebih stabil. Material tanggul baru tersebut diambil dari sumber galian C di Watu Kosek. Untuk menanggulangi pengambilan material galian yang terus

menerus maka Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo/ PPLS pada tahun 2018 melakukan penelitian untuk memanfaatkan lumpur Sidoarjo yang dicampur dengan tanah galian pasuruan sebagai alternatif material tanggul.

Penelitian tersebut dilakukan dengan cara membuat tanggul uji seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2. Material dari tanggul uji tersebut merupakan campuran dari material LuSi dan tanah galian Pasuruan. Tanah galian Pasuruan dipilih dikarenakan sifat fisik dari LuSi kurang menguntungkan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.1; sedangkan sifat fisik dari tanah galian Pasuruan diberikan pada Tabel 1.2. Berdasarkan Tabel 1.1 diketahui bahwa Indeks Plastisitas (IP) LuSi sangat tinggi.

Gambar 1. 2 Tanggul Uji (Dokumentasi observasi lapangan, Indra Rahma, 2019)

Tabel 1. 1 Hasil Pengujian Batas- Batas *Atteberg* Lumpur Sidoarjo

No	Pengujian	Hasil Uji	Satuan
1	Batas Cair *(Liquid Limit)*	72,60	%
2	Batas Plastis *(Plastic Limit*)	38,62	%
3	Batas Susut *(Shringkage Limit)*	10,83	%
4	Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)	33,98	%

Sumber: Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018

Tabel 1. 2 Sifat Fisis Tanah Galian Pasuruan

No	Pengujian	Hasil Uji	Satuan
1	Batas Cair *(Liquid Limit)*	45,3	%
2	Batas Plastis *(Plastic Limit*)	34,52	%
3	Batas Susut *(Shringkage Limit)*	4,91	%
4	Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)	10,78	%

Sumber: Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemetrian PUPR, 2018

Berdasarkan penerapan penelitian tanggul tahun 2018, PPLS melakukan observasi dan evaluasi kinerja dari tanggul pada tahun 2019. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan, terdapat retakan pada tanggul (Gambar 1.3) yang ditengarai sebagai akibat adanya perubahan karakteristik tanah saat terjadinya perubahan musim dan juga sebagai akibat dari campuran material kurang memenuhi persyaratan sebagai material timbunan.

Gambar 1. 3 a) Retakan Sisi-Sisi Tanggul b) Gambar Retakan Tengah Tanggul (Dokumentasi Observasi lapangan Indra R, 2020)

Apabila perubahan musim terjadi secara terus-menerus maka akan mengubah sifat kondisi tanah, baik secara fisis maupun mekanis. Kondisi ini menjadi penyebab terjadinya peristiwa keretakan pada tanggul; kondisi ini biasanya terjadi pada akhir musim hujan. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Kuwano and Chen (1990) menyampaikan 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. Perubahan musim dipengaruhi oleh nilai *suction*, sehingga pengaruhnya pada SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)* ini diteliti untuk mengetahui dampaknya terhadap kestabilan tanggul.

Disisi lain, campuran LuSi dan tanah galian Pasuruan memiliki Indeks plastisitas tinggi di mana tidak sesuai dengan persyaratan material timbunan. Hal tersebut pula yang melatarbelakangi bahwa diperlukan data penelitian lain dengan material campuran LuSi dan tanah lempung yang memiliki indeks plastisitas rendah sebagai pembanding terpilihnya material yang memenuhi persyaratan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor keamanan dari beberapa konfigurasi geometri tanggul dengan variasi muka air tanah dan variasi endapan lumpur dengan mempertimbangkan pengaruh nilai suction pada SWCC. Analisa faktor keamanan dilakukan dengan menggunakan program bantu Geostudio. Selain itu juga penelitian ini bertujuan untuk mencari besarnya pemampatan segera dengan menggunakan program bantu PLAXIS.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan, dapat dirumuskan menjadi beberapa detail permasalahan sebagai berikut :

1. Bagaimana pemodelan nilai *matric suction* pada SWCC untuk material tanggul yang terbuat dari material LuSi pada tanah lempung ?
2. Bagaimana stabilitas tanggul yang terbuat dari material LuSi dan tanah lempung akibat pengaruh muka air tanah dan endapan lumpur dengan

beberapa variasi geometri tanggul yang menerapkan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) ?

3. Berapa besar pemampatan segera (*Immediate settlement)* dari tanggul yang terbuat dari material LuSi dan tanah lempung ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan pada penelitian ini antara lain :

1. Sebagai pemodelan nilai *matric suction* pada SWCC untuk material tanggul yang terbuat dari material LuSi pada tanah lempung.
2. Untuk mengetahui stabilitas tanggul yang terbuat dari material LuSi dan tanah lempung akibat pengaruh muka air tanah dan endapan lumpur dengan beberapa variasi geometri tangggul yang menerapkan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
3. Untuk mengetahui besar pemampatan segera (*Immediate settlement)* dari tanggul yang terbuat dari material LuSi dan tanah lempung.

1.4. Manfaat Penelitian

Implikasi hasil penelitian yang diharapkan yaitu memanfaatkan potensi lumpur Sidoarjo dan tanah lempung sebagai bahan material timbunan tanggul dengan komposisi campuran paling optimum.

1.5. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan komposisi campuran optimum dan penentuan SWCC (*Soil water characteristic curve)* didapatkan dari data sekunder penelitian terdahulu.
2. Penentuan stabilitas tanggul menggunakan program bantu Geostudio dengan 3 variasi model geometri (kemiringan dan ketinggian tanggul), endapan lumpur, dan muka air tanah.
3. Penentuan pemampatan segera menggunakan program bantu PLAXIS dengan dengan konfigurasi geometri kemiringan yaitu 1:1, 1:1,5 dan 1:2 serta ketinggian 3 m, 5 m, dan 7 m.

1.6. Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian ini adalah berada di dalam area terdampak lumpur panas, di Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Kawasan area terdampak lumpur Sidoarjo ini secara geografis terletak di antara 7°30’40”- 7°32’31” LS dan 112°42’28” - 112°43’6” BT.

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA

Bab ini akan dibahas tentang definisi, konsep, kajian teori, dan penelitian terdahulu.

2.1. Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (LuSi)

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 ilmuan termuka Rusia yang meneliti semburan lumpur Sidoarjo menyatakan bahwa bencana tersebut bukan disebabkan aktivitas pengeboran

sumur minyak di area tersebut. Tim ilmuan 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)

Bencana Lumpur Sidoarjo merupakan fenomena meluapnya semburan lumpur dari perut bumi yang terjadi di Sidoarjo. Davies (2008, dikutip dari journal Anton Novenanto 2010). Selain mengeluarkan lumpur dengan volume sangat besar di sekitar semburan, akhir-akhir ini ditemukan bual-bual yang sampai April 2007 dicatat oleh Badan Pengendalian Lumpur Sidoarjo (BPLS), sebanyak 62 titik bual aktif maupun tidak aktif.

Semburan lumpur yang dikeluarkan semenjak 29 Mei 2007 berupa lumpur bercampur air panas dengan volume tidak kurang dari 50.000 sampai 150.000 m^3 /hari. Lumpur tersebut sampai 15 April 2007 telah menggenangi daerah tidak kurang dari 5,0 km^2 dengan tinggi genangan bervariasi dari 10 m di pusat semburan sampai kurang dari 1 m di tepi semburan. Lumpur tersebut diperkirakan berasal dari kedalaman 750 m sampai 1.900 m dengan material kerikil sampai lempung plastis. (Sudarsono dkk. 2007)

Tabel 2. 1 Kandungan Lumpur Sidoarjo Berdasarkan Ukuran Butiran

JENIS	PROSENTASE
Clay (Lempung)	71,43 %
Silt (Lanau)	10,71 %
Sand (Pasir)	17,86 %

Sumber : Nurwarsito dan Setyowati, 2009

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui kandungan dari lumpur tersebut. Penelitian tersebut diantaranya mencakup komposisi lumpur berdasarkan ukuran butirannya (Tabel 2.1). Kandungan kimia lumpur berdasarkan pengujian toksinologi dari 3 laboraturium terakreditasi yaitu Laboraturium Sucofindo, Corelab, dan Bogorlab diperoleh kesimpulan bahwa lumpur tidak termasuk limbah B3, dari hasil pengujian menunjukkan bahwa semua parameter bahan kimia itu dibawah baku.

Gambar 2. 1 Kondisi Lumpur Sidoarjo (Dokumentasi Penulis, 2018)

Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa lumpur Sidoarjo memiliki kandungan SiO_2,Al2O_3, dan Fe_2O_3 masing-masing 53.08%, 18.27%, dan 5.6%. Material tersebut dapat digunakan sebagai pengganti sebagian semen yang disyaratkan harus memiliki kandungan senyawa SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_3 minimum 70% (Aristianto, 2006). Data dari Pusat Litbang Sumber Daya Air, Pengujian Kandungan Organik Berdasarkan hasil pengujian, Lumpur Sidoarjo memiliki kadar kandungan bahan organik sebesar 3082.76 ppm atau 3082.76 mg/kg atau 0.31%.

2.1.1. Kandungan Lumpur Sidoarjo

1. Sifat Fisis LuSi

Pengujian sifat fisik LuSi dapat ditentukan antara lain pengujian kepadatan (*density*), analisa saringan, plastisitas (LL dan IP), *spesific gravity* (Gs), dan pengujian gambaran susunan partikel secara mikro dengan alat

SEM(*Scanning Electron Microscope*). Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Faizah (2013) diperoleh data-data sebagai berikut :

Tabel 2. 2 Parameter Hasil Pengujian Sifat Fisik LuSi

PARAMETER		SATUAN	HASIL UJI	KLASIFIKASI
Lolos ayakan no.200		%	99,33	Tergolong CH-Soil (berdasarkan metode USCS Lolos ayakan 200 >50)
Batas cair	LL	%	81,58	
Indeks Plastisitas	IP	%	49,02	
Prosentase Swelling		%	26,08	
Specific Gravity	Gs	%	2,52	

Sumber: Faizah, 2013

Pada Tabel 2.2 menjelaskan bahwa nilai Liquid Limid (LL) atau batas cair dari lumpur Sidoarjo yaitu 81,58 % yang menggolongkan Lumpur Sidoarjo berplastisitas tinggi.

Beberapa uji yang dilakukan terkait dengan sifat fisika lumpur antara lain pengujian densitas lumpur, analisa keseragaman butir, pengujian gambaran susunan partikel secara mikro dari lumpur. Hasil pengujian densitas lumpur menunjukkan bahwa lumpur cukup berat berkisar (1,24 – 1,37) karena adanya kandungan oksida dan ukuran partikelnya.

Oksida silika, kalsium, natrium, dan kalium mempunyai densitas yang berat dan menyebabkan lumpur juga mempunyai densitas yang berat. Disamping itu, secara fisik lumpur mempunyai ukuran partikel yang halus, sehingga ruang yang ditempati akan semakin kecil, dan jarak antar partikel semakin kecil. Hasil analisa keseragaman butir *(grainsize)* menggambarkan bahwa komponen terbesar adalah clay (sekitar 81,5 %) yang berarti bahwa butiran lumpur sangat halus.

Karena ukuran partikel sangat halus, maka sesama partikel dapat menyusun diri sangat rapat sehingga tidak mudah diintroduksi oleh molekul lain (misalnya molekul air). Sedangkan untuk penelitian lain dilakukan oleh Maliki (2015), menyatakan distribusi ukuran butiran LuSi didominasi oleh molekul (misalnya molekul air) dan pada penelitian tersebut juga menyebutkan distribusi ukuran butiran LuSi didominasi oleh butiran lanau lempung sebesar 94,98 % dan

sisanya berupa butiran pasir halus sebesar 5,02 % yang berarti bahwa tanah LuSi sebagian besar merupakan butiran halus.

2. Sifat Kimiawi Lusi

Kandungan kimia lumpur berdasarkan pengujian toksikologis dari 3 laboratorium terakreditasi (Sucofindo, Corelab dan Bogorlab) diperoleh kesimpulan bahwa lumpur tidak termasuk limba B3. Hasil pegujian 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. 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*

Pengujian Kandungan Mineral Hasil pengujian kandungan mineral Lumpur Sidoarjo yang diambil dari 3 (tiga) lokasi dapat dilihat pada Tabel 2.3 sebagai berikut, menunjukkan bahwa kandungan lumpur Sidoarjo mempunyai kecenderungan untuk semakin tinggi kadar SiO_2, pada lokasi 1 pengambilan sampel lumpur sidoarjo memiliki kandungan 65 % maka semakin tinggi kadar

SiO_2 semakin rendah kandungan aluminanya. Kadar besi oksida yang berkisar antara 4 % Fe_2O_3. Apabila kandungan besinya melebihi 12 % merupakan sesuatu yang tidak normal hasil pengujian mineral lumpur sidoarjo, dimana hasil analisa lumpur Sidoarjo memiliki kandungan mineral dan kimia yang tidak jauh beda dengan kandungan mineral tanah lempung terutama dengan kandungan silika sangat tinggi.

Tabel 2. 4 Hasil Pengujian Mineral Lumpur Sidoarjo

Sampel	Jenis Mineral	Kandungan (%)
Lokasi 1	Quartz SiO_2	65
	Sulfur S	10
	Calcite $CaCO_3$	8
	Kaolinite $Al_2(Si_2O_3)(OH)_4$	7
	Illite $(K_1H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	6
	Vermiculite $_{22}Mg_{0.5}Al_2O_3.Fe_2O_{3.22}SiO_{2.40}H_2O$	4
	Magnesium Aluminum Phospate $Mg_{0.2}Al_{0.8}PO_4$	Trace
Lokasi 2	Quartz SiO_2	40
	Albite $Na(AlSi_3O_8)$	15
	Vermiculite $_{22}Mg_{0.5}Al_2O_3.Fe_2O_{3.22}SiO_{2.40}H_2O$	8
	Montmorillonite $Na_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2H_2O$	8
	Illite $(K_1H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	8
	Calcite $CaCO_3$	7
	Sulfur S	5
	Kaolinite $Al_2(Si_2O_3)(OH)_4$	5
	Magnesium Aluminum Phospate $Mg_{0.2}Al_{0.8}PO_4$	4
	Aluminum Oxide Al_2O_3	Trace
	Magnetite Fe_3O_4	Trace
Lokasi 3	Quartz SiO_2	67
	Sulfur S	8
	Illite $(K_1H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	7
	Magnesium Aluminum Phospate $Mg_{0.2}Al_{0.8}PO_4$	4
	Kaolinite $Al_2(Si_2O_3)(OH)_4$	4
	Vermiculite $_{22}Mg_{0.5}Al_2O_3.Fe_2O_{3.22}SiO_{2.40}H_2O$	4

Sumber: Balai Litbang PUPR, 2018

Tabel 2.4 menunjukkan Kandungan pirit Fe_2O_3 yang tinggi terbentuk pada lingkungan reduksi, kondisi anaerobis, genangan air tenang yang mungkin terdapat di tempat yang dalam dan terputus hubungannya dengan atsmosfer oleh stratifikasi yang disebabkan oleh perbedaan densitas air.

2.1.2. Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo

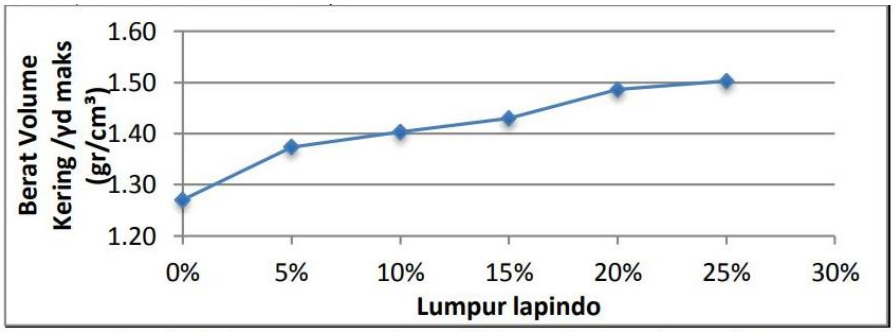
Hasil penelitian tentang Lumpur Sidoarjo menujukkan beberapa pemanfaatan Lumpur Sidoarjo. Dalam upaya pemanfaatannya, dicoba untuk dikembangkan sebagai bahan bangunan seperti bata merah dan genteng keramik melalui proses pembakaran sehingga diperoleh produk yang keras dan stabil.

Karena sifat teknis dari bahan dasar yang kurang baik, maka untuk memperbaikinya perlu ditambahkan bahan penyetabil yang dalam penelitian ini menggunakan *fly ash* sebanyak 10 sampai 40% dari berat bahan. Proses pembentukan bata dan genteng dilakukan setelah bahan baku dicampur dengan air sampai menjadi adonan yang lembab dan dibentuk dengan menggunakan alat cetak.

Dari hasil penelitian diperoleh data bahwa untuk pembuatan bata suhu bakar minimum adalah 800 °C dan untuk pembuatan genteng harus mencapai suhu bakar 1000 °C dengan waktu sintering selama 3 jam menghasilkan bata merah dan genteng yang kedap dan kuat. Dengan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa lumpur tersebut dapat dikembangkan sebagai bahan bangunan keramik seperti bata merah dan genteng dengan menambahkan abu batubara. (Lasino dkk, 2010)

2.2. Pencampuran Material Lumpur Sidoarjo (LuSi) dan Tanah Lempung Kertajaya Indah Timur Surabaya

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo / PPLS, stabilisasi tanah lempung ruas jalan kertajaya Indah Timur Surabaya dengan campuran lumpur Lapindo. Beberapa prosentase campuran tanah lempung Kertajaya Indah dan Lumpur Lapindo dengan konsentrasi Lumpur Lapindo: 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%.



Gambar 2. 2 Hubungan Antara Berat Volume Kering dan Lumpur Lapindo (Gati Sri Utami, 2015)

Berdasarkan Gambar 2.2 dilakukan pula uji standart proktor dengan pemeraman 3 hari, hasil yang didapatkan yaitu mencari nilai baik dan paling efektif adalah penambahan Lumpur Lapindo dengan prosentase campuran 20%. Setelah distabilisasi menjadi tanah lempung yang plastisitas sedang, cukup baik sebagai tanah dasar dan termasuk lempung keras. Setelah dicampur dengan Lumpur Lapindo sampai dengan prosentase 20%.

a. Nilai Liquid Limit (LL) = 35%, Indeks Plastisitas (IP) = 14.49% dan *Swelling* = 1.64%, termasuk kategori tanah plastisitas sedang.

Tabel 2. 5 Prosentase Peningkatan Berat Volume Kering

Tanah Lempung + Lumpur lapindo	0%	5%	10%	15%	20%	25%
γ_{dmax} gr/m^3	1,27	1,37	1,4	1,43	1,49	1,5
Peningkatan (%)		7,87	10,24	12,6	17,32	18,11

Sumber : Gati Sri Utami, 2015

b. Beberapa hasil dari Tabel 2.5 dinyatakan dalam kesimpulan untuk campuran 20 % sebagai berikut, nilai γdmax = 1.49 Kg/cm³, dan nilai C.B.R = 6.58%. Maka, campuran masuk dalam kategori plastisitas sedang sebagai tanah dasar.

c. Nilai Kohesi (c) = 0.395 Kg/cm² sedangkan nilai Sudut Geser Dalam (Ø) = 5.76°. Nilai qu = 1.88 Kg/cm² termasuk kategori tanah keras.

2.2.1. Nilai Spesifikasi Timbunan Biasa dengan SNI pada Campuran LuSi dan Tanah Lempung

Menurut Peraturan timbunan biasa, PUPR syarat timbunan biasa sebagai berikut :

1. 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*".
2. 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.

3. 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 03-17421989.
4. 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.
5. Nilai aktif adalah perbandingan antara Indeks Plastisitas / PI - (SNI 03-19661989) dan persentase kadar lempung (SNI 03-3422-1994).

Persyaratan timbunan tersebut digunakan untuk mengklasifikasi data sekunder campuran LuSi dan tanah lempung untuk kemudian divalidasi memenuhi spesifikasi timbunan biasa atau tidak memenuhi spesifikasi. Tujuan validasi spesifikasi timbunan agar timbunan dapat berfungsi optimum sesuai dengan kegunaan timbunan yang akan direncanakan.

2.3. Nilai *Suction* pada SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)*

Secara alamiah, siklus pengeringan-pembasahan yang berulang secara terus menerus sepanjang waktu akan mengakibatkan terjadinya perubahan pada kekuatan tanah. Maekawa dan Miyakita, menyimpulkan bahwa jumlah siklus pengeringan-pembasahan dan tingkat pengeringan mempengaruhi kekuatan geser tanah. Dari penelitian ini, juga menunjukkan bahwa jumlah siklus pengeringan-pembasahan memperbesar perubahan parameter tanah dan terlihat pada siklus ke 5 dan 6 parameter tanah cenderung konstan dan berusaha menunjukkan pengaruh siklus pengeringan-pembasahan dan pengulangannya terhadap kekuatan dinamik tanah.

Proses pembasahan dilakukan dengan menetesi sampel tanah setetes demi setetes sampai tanah mencapai kadar air yang diinginkan. Proses pengeringan dilakukan dengan mengangin-anginkan sampel tanah sampai tanah mencapai kadar air yang diinginkan (*Fredlund* dan Rahardjo, 1993).

2.3.1. Total *Suction*

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:

$$pF = \log (u_w) \qquad (2.1)$$

dengan:

u_w = tinggi kolom air dalam cm.

pF = besarnya hisapan dari grafik yang hubungan kadar air W (%) dengan tinggi kapilaritas (m)

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 (Edlefsen dan Anderson, 1943), *suction* umumnya disebut sebagai suatu keadaan energi bebas dari air tanah. Pengukurannya menggunakan tekanan air dimana berdasarkan persamaan kelvin (Sposito, 1981) dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Psi = -\frac{RT}{v_{WO}\omega_V}\ln\left(\frac{u_v}{u_{vo}}\right) \qquad (2.2)$$

dengan:

Ψ = total *suction* (kPa),

R = konstanta gas (J/(mol.K)

T = suhu (K)

v_{wo} = specific volume (m^3/Kg)

ω_v = massa molekul uap air (g/mol)

u_v = tegangan air pori (kPa)

u_{vo} = tegangan air pori pada permukaan air dengan suhu yang sama (kPa).

Nilai (u_v/u_{vo}) disebut dengan kelembapan relatif, RH (persen).Total *suction* dirumuskan sebagai berikut.

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \qquad (2.3)$$

dengan:

Ψ = total *suction* (kPa)

u_a = tekanan udara

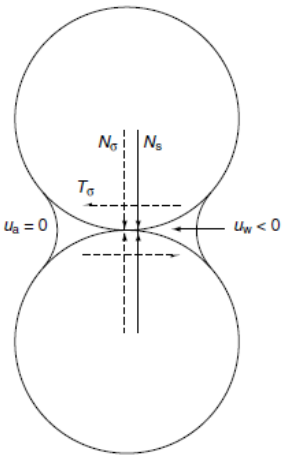
u_w = tekanan air

π = *osmotic suction*

Perubahan total *suction* secara umum disebabkan oleh perubahan dari RH dalam tanah. RH dapat berkurang pada kecekungan permukaan air dalam fenomena kapiler (Fredlund dan Rahardjo, 1993). Selisih antara tekanan udara (u_a) dengan tekanan air (u_w) pada permukaan air disebut dengan *matric suction*. *Osmotic suction* adalah fungsi dari banyaknya garam yang terlarut dalam pori berupa cairan dan diberikan beban tekanan uap untuk memperoleh nilai *suction*. *Osmotic suction* dihasilkan dari gaya yang berada dalam molekul air sebagai hasil dari aktivitas kimia tanah.

Molenkamp dan Nazemi (2003), Li (2003) menunujukkan adanya tekanan antar partikel yang disebabkan oleh miniscus air berada dalam kesetimbangan statis dengan diterapkannya tegangan eksternal. Akan tetapi nilai tegangan eksternal tidak akan pernah sama dengan tekanan antar partikel (Wheeler, 2006).

Gambar 2.3 merupakan partikel tanah *unsaturated* yang terdiri dari partikel tanah, tekanan atsmosfer udara dan tekanan air pori negatif dengan bidang kontak miniskus (Wheeler dan Karube, 1995).



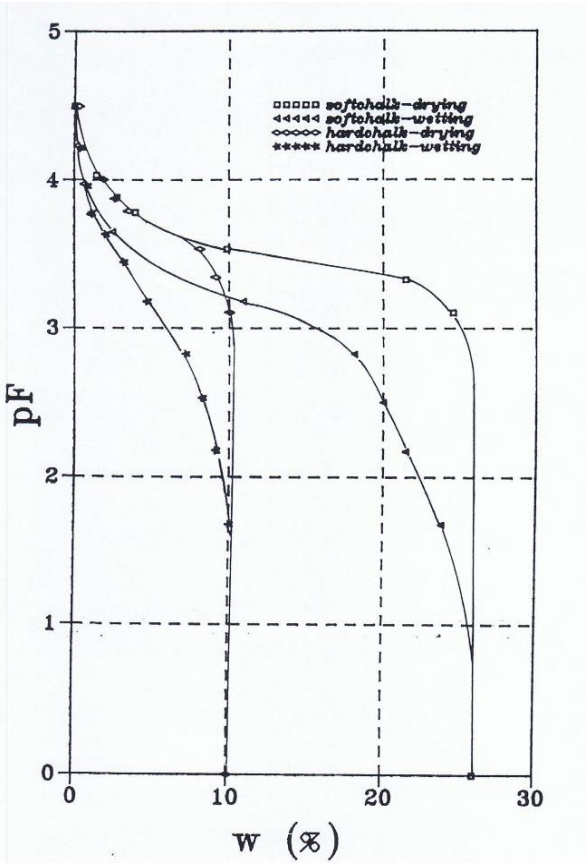
N_σ adalah tekanan normal antar butiran yang disebabkan oleh tegangan eksternal

T_σ adalah tangensial antar butiran yang disebabkan oleh tegangan eksternal

N_S adalah tekanan antar butiran disebabkan suction

Gambar 2. 3 Pengaruh tegangan eksternal dan suction terhadap tekanan antar butiran tanah (WW.Ng dkk, 2007)

Croney dan Coleman (1954) melakukan penelitian pada dua jenis kapur yang terdrainase yang disajikan dalam kurva pada Gambar 2.4.

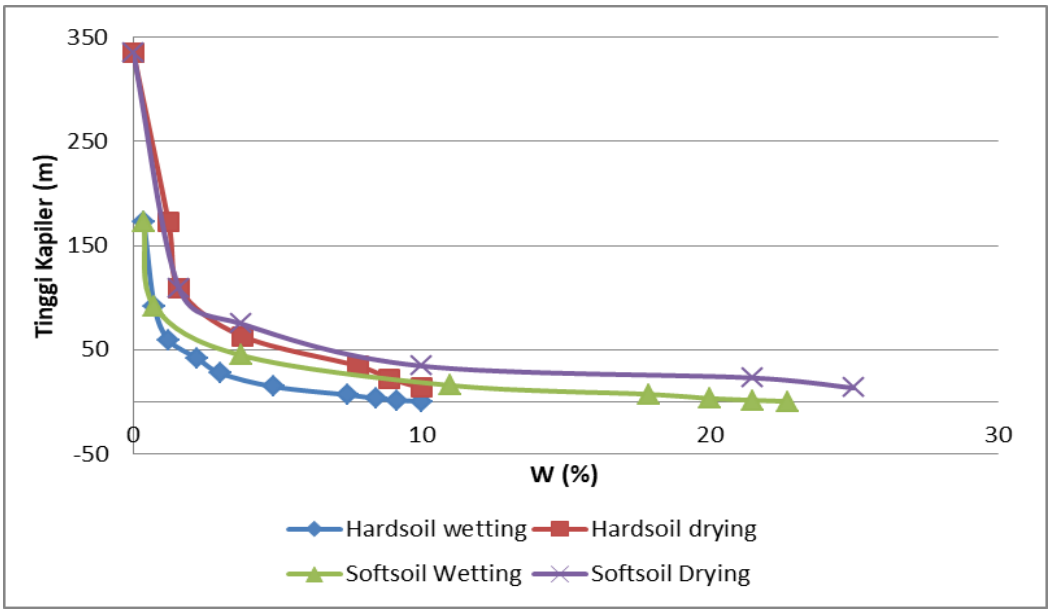


Gambar 2. 4 Kurva drainase dua jenis bahan kapur (*Corney* dan *Coleman* 1954)

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, misalkan untuk suatu tanah yang akan diukur hisapannya didapat 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 = Log (1000), bila dinyatakan dalam cm maka invers log 3 atau 10^3= 1000.

Pada Gambar 2.5 nilai-nilai pF dikalibrasikan dalam satuan meter untuk memperoleh gambar grafik hubungan kadar air W (%) dengan tinggi kapilaritas

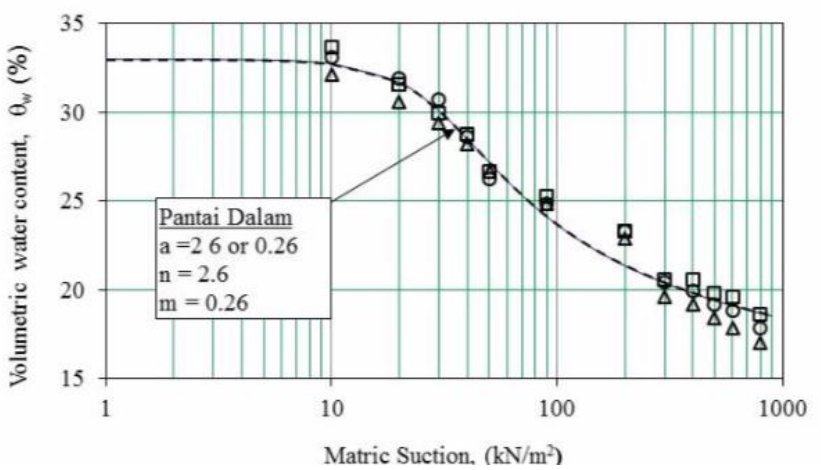
(m). Hasil kalibrasi tersebut disajikan pada Gambar 2.4. Nilai *water retention* dapat diperoleh dari besarnya tinggi kapilaritas.



Gambar 2. 5 Kurva drainase dua jenis bahan kapur (Corney dan Coleman 1954) yang telah dikalibrasi

2.3.2. Data SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve)* Campuran LuSi dan Tanah Lempung

Berikut data SWCC yang digunakan untuk pemodelan SEEP/W untuk campuran LuSi dan tanah lempung.



Gambar 2. 6 Data SWCC Tanah Pantai Dalam (M.Yusof, 2016)

Pada Gambar 2.6 menjelaskan tentang data SWCC (*Soil-Water Characteristic Curve*) dengan hasil volumetric water content pada sumbu “x” dan matric suction direpresentasikan sumbu “ y”. Data SWCC tersebut digunakan sebagai parameter untuk SEEP/W serta untuk mengetahui pengaruh nilai suction terhadap faktor keamanan tanggul.

Tabel 2. 6 SWCC Plot Data Pantai Dalam

Data SWCC Tanah Pantai Dalam, Malaysia	
Vol. Water Content m^3/m^3	**Matric Suction** **kPa**
0,329	1
0,327	10
0,3099	20
0,298	30
0,288	40
0,27	50
0,25	90
0,225	200
0,2	300
0,19	400

Sumber : M.Yusof , 2016

Berdasarkan Tabel 2.6, suction maksimum terjadi ketika *volumetric water content (*VWC) berada pada titik minimum yaitu ketika butir tanah memiliki rongga yang cukup untuk menyerap air.

2.4. Stabilitas Lereng

Dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Menurut Hardiyatmo (2010), analisis stabilitas lereng didasarkan oleh beberapa anggapan – anggapan yaitu :

1. Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang 2 dimensi.
2. Massa tanah yang longsor dianggap sebagai benda masif.
3. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor

tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain, kuat geser tanah dianggap isotropis.

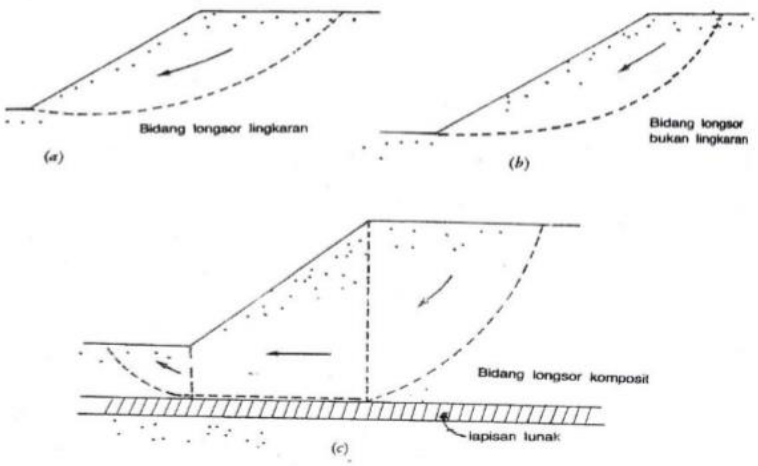
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata – rata sepanjang bidang longsor potensial, dan kuat geser tanah rata – rata sepanjang permukaan longsoran. Jadi kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik – titik tertentu pada bidang longsornya, padahal faktor aman hasil > 1.

Tabel 2. 7 Hubungan Nilai Faktor Keamanan Lereng dan Intensitas Longsor

Nilai Faktor Keamanan	Kejadian/ Intensitas Longsor
F kurang dari 1,07	Longsor terjadi biasa/ sering (lereng labil)
F antara 1,07 sampai 1,25	Longsor pernah terjadi (lereng kritis)
F diatas 1,25	Longsor jarang terjadi (lereng relatif stabil)

Sumber: Bowles, 1989

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai pembanding antara gaya yang menahan dengan gaya yang menggerakkan atau menggeserkan. Menurut Hardiyatmo (2010) faktor aman stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2 – 1,5, sehingga kondisi lereng kritis tidak terjadi.



Gambar 2. 7 Bentuk – Bentuk Bidang Longsor (Hardiyatmo, 2010)

2.4.1. Longsoran *(Sliding)*

Salah satu faktor penyebab longsor yang sangat berpengaruh adalah bidang gelincir atau bidang geser. Bidang gelincir adalah bidang yang menjadi landasan bergeraknya massa tanah. Bidang gelincir merupakan bidang yang kedap air dan licin. Bidang gelincir dibedakan menurut bentuknya yaitu rotasi dan translasi (Sugito, dkk., 2010).

Kedalaman bidang gelincir penting untuk diketahui karena dapat mengetahui seberapa besar resiko longsor yang terjadi. Semakin dalam bidang gelincir, tingkat bahaya longsor akan semakin besar. Sebaliknya, semakin dangkal bidang gelincir, tingkat bahaya longsor semakin kecil. Bila diukur dari permukaan terdapat 4 kelas kedalaman bidang gelincir, yaitu sangat dangkal (20 m) (Zakaria, 2011).

Menurut Nandi (2007), gejala umum tanah longsor ditandai dengan munculnya retakan retakan di lereng yang sejajar dengan arah tebing, biasanya terjadi setelah hujan, munculnya mata air baru secara tiba-tiba dan tebing rapuh serta kerikil mulai berjatuhan. Proses terjadinya tanah longsor dapat diterangkan sebagai berikut: air yang meresap kedalam tanah akan mernambah bobot tanah. Jika air tersebut menembus sampai tanah kedap air yang berperan sebagai bidang gelincir, maka tanah menjadi licin dan tahanan pelapukan diatasnya akan bergerak mengikuti lereng dan luar lereng.

Bidang gelincir dapat diperoleh dari kontras hambatan jenis antar dua batuan yang saling berdekatan. Bila hambatan jenis lapisan atasnya jauh lebih rendah dari hambatan jenis lapisan bawahnya, maka sangat memungkinkan terjadi longsoran hal ini dikarenakan lapisan tersebut akan gampang terkikis dan mengalir, apalagi bila didukung oleh bidang yang cukup terjal dan curah hujan diwilayah tersebut cukup tinggi.

Berdasarkan beberapa penelitian yang dipaparkan disimpulkan bahwa bidang gelincir merupakan faktor penyebab utama kelongsoran. Kedalaman bidang gelincir penting untuk diketahui karena dapat mengetahui seberapa besar resiko longsor yang terjadi. Semakin dalam bidang gelincir, tingkat bahaya longsor akan semakin besar. Sebaliknya, semakin dangkal bidang gelincir, tingkat

bahaya longsor semakin kecil. Bila diukur dari permukaan terdapat 4 kelas kedalaman bidang gelincir, yaitu sangat dangkal (20 m) (Zakaria, 2011).

Penelitian dengan menggunakan metode seismik refraksi yang dilakukan oleh Sri Utami (2014). Pada penelitian tersebut diperoleh tiga lapisan tanah. Lapisan pertama berupa pasir kering, lapisan kedua berupa lempung pasiran, dan lapisan ketiga berupa batu pasir. Bidang gelincir penyebab tanah longsor diduga berada diantara lapisan lempung pasiran dan batu pasir. Ini berarti lapisan yang berperan sebagai bidang tempat bergeraknya material longsor keluar lereng adalah lapisan batu pasir.

Tabel 2. 8 Litologi Batuan Bawah Permukaan Pada Lintasan Pertama

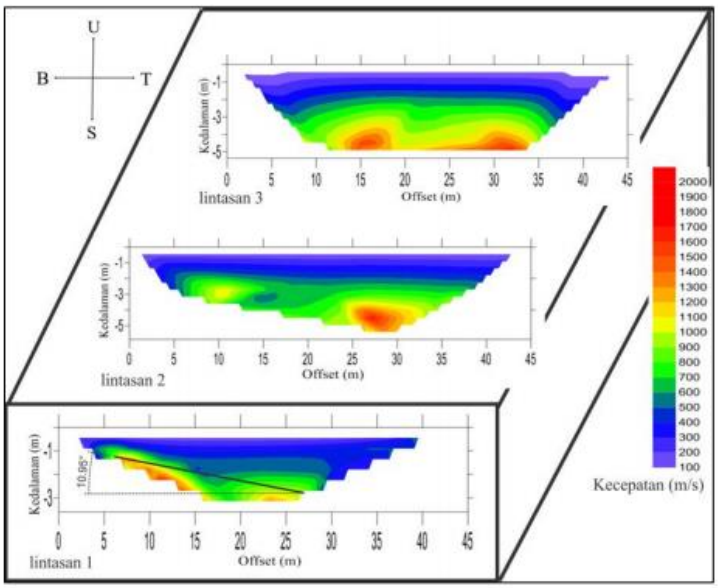
Kecepatan (m/s)	Jenis batuan perkiraan	Kedalaman (m)
254,7771-704,2254	Pasir	0,5-3
735,2941-1886,7920	Lempung berpasir	3-3,5
310,3181-826,4463	Pasir	1-4,5
1064.861-1724,138	Lempung	>4,5
490,1961-892,8571	Pasir	2-5
945,6265-1562,5	Lempung berpasir	>5

Sumber : Sri Utami, 2014

Berdasarkan Tabel 2.8 menunjukkan perbedaan jenis material pada daerah penelitian mengindikasikan adanya bidang gelincir *(slip surface*) yang menyebabkan terjadinya tanah longsor. Pada umumnya tanah atau bidang yang mengalami longsoran akan bergerak di atas bidang gelincir tersebut. Bidang gelincir berada diantara bidang yang stabil dan bidang yang bergerak (bidang yang tergelincir). Bidang gelincir daerah pengukuran diperlihatkan pada Gambar 2.8.

Dapat disimpulkan dari Gambar 2.8 menjelaskan bahwa bidang gelincir terletak di antara lapisan tidak kedap air (pasir) dan lapisan tidak kedap air (lempung). Material pasir (lapisan permeable) ini merupakan material yang dapat menyimpan kandungan dan mudah meloloskan air sehingga jika air hujan melalui

retakan akan terakumulasi pada lapisan ini, sehingga akan menambah beban pada gaya penahan, ini akan berbahaya jika curah hujan tinggi dan akan masuk kedalam batuan akuifer tersebut sehingga membebani lereng yang akan memicu terjadinya tanah longsor.



Gambar 2. 8 Letak Bidang Gelincir (Sri Utami, 2014)

Di mana tempat pengambilan lintasan ini sebelumnya pernah mengalami longsoran. Material lempung (lapisan *impermeable*) sendiri ketika musim kemarau akan kering dan mengeras menimbulkan retakan-retakan. Hal ini akan menyebabkan air permukaan meresap ke dalam lapisan tanah atau batuan melalui pori-pori antar butir tanah kemudian tertahan pada lapisan lempung di bawahnya, sehingga permukaan batu lempung akan menjadi lunak dan licin sehingga menjadikannya sebagai bidang gelincir.

Dan pada saat terjadi hujan, air hujan akan meresap dan menembus tanah hingga ke lapisan kedap air yaitu lempung. Lapisan inilah yang akan berperan sebagai bidang gelincir dan menyebabkan gerakan tanah atau longsor.

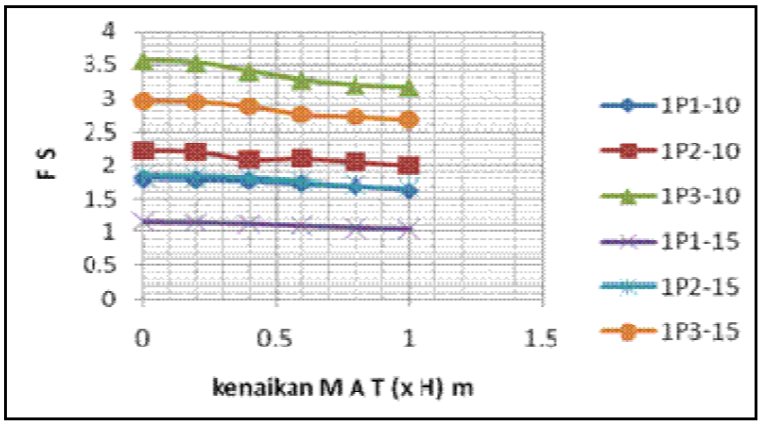
Berdasarkan hasil penelitian dapat diambil kesimpulan bahwa keadaan litologi bawah permukaan yang berupa pasir dengan kecepatan rambat gelombng seismik pada lapisan pertama 254,7771 m/s - 704,2254 m/s pada kedalaman 0,5 m – 3.5 m dan berupa tanah lempung dengan kecepatan rambat gelombang seismik

945,6265 m/s - 1886,7920 m/s dengan kedalaman 3,5 m-5,5m. Bidang gelincir pada lintasan pertama yang terdapat pada Tabel 2.8 memiliki kemiringan sebesar 10,95° terhadap arah horizontal dengan kemiringan barat laut-tenggara.

2.4.2. Pengaruh Perubahan Muka Air Tanah terhadap Kestabilan Lereng

Berdasarkan penelitian Nilai angka keamanan lereng (FS) untuk kelandaian 1:1, 1:2, dan 1:3 akibat perubahan ketinggian muka air tanah bawah lereng dapat dilihat pada Gambar 2.9. Dari grafik pada Gambar 2.9 terlihat bahwa nilai FS semakin besar akibat perubahan kemiringan suatu lereng yang semakin landai.

Semakin tinggi muka air tanah dari dasar lereng akan memperkecil angka keamanan lereng. Untuk pengaruh ketinggian lereng dimana yang dicoba adalah tinggi 10 meter dan 15 meter, pada kelandaian yang sama lereng yang lebih tinggi mempunyai angka keamanan yang lebih rendah yang dapat dilihat pada grafik.



Gambar 2. 9 Nilai FS akibat perubahan muka air tanah bawah lereng lempung sedang (I G. N. Wardana, 2011)

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. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa untuk lereng dengan kemiringan 1:1, 1:2 dan 1:3 angka

keamanannya bertambah besar dengan bertambahnya teras dari T1 sampai T4, angka keamanan terbesar di dapat dari T4.

Lereng pasir dengan kemiringan 1:1, kenaikan angka keamanan dengan terasering T1 sangat kelihatan, sedang untuk tipe T2, T3 dan T4 tidak jauh berbeda. Lereng pasir dengan kemiringan 1:2 dan 1:3 terasering T1 sampai T4 rata-rata memberikan kenaikan angka keamanan. Lereng tanah lempung untuk gempa 0,25 g rata-rata memberikan pengurangan angka keamanan 43%, untuk gempa 0,45 g memberikan pengurangan 55%. Gempa 0,25 g pada tanah pasir memberikan pengurangan angka aman 50%, dan gempa 0,45 g sebesar 70%.

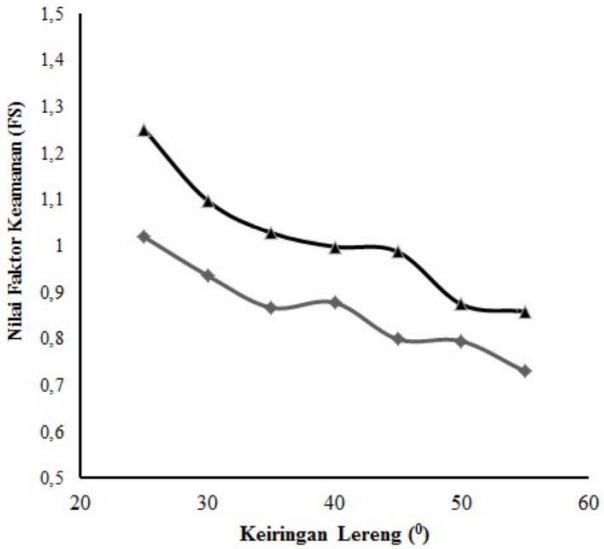
Penelitian lainnya yaitu melakukan analisis pengaruh tinggi muka air tanah terhadap faktor kestabilan lereng menggunakan aplikasi SLOPE/W (Nurhidayat dkk, 2016). Penelitian ini dilakukan di Provinsi Sumatera Selatan di daerah Tambang Batu Bara.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengambilan sampel tanah dengan pengeboran geoteknik, dan pengujian sampel tanah dilakukan di laboratorium untuk mengetahui karakteristik fisik dan mekanik dari tanah dalam kondisi gempa dan dalam kondisi muka air tanah alami maupun kondisi dewatering. Berdasarkan hasil pengujian sampel tanah dilaboratorium dimana tanah didapat dari hasil pengeboran dilapangan, litologi pada daerah penelitian didominasi oleh batu lempung dan batu pasir.

Analisis kestabilan lereng dibuat dengan kondisi gempa (seismic load). Analisis kestabilan lereng ini berdasarkan pada keadaan muka air tanah dengan kedalaman 5 meter dan kondisi dewatering dengan kedalaman muka air tanah 1/3 dari tinggi lereng. Nilai RMR pada daerah penelitian berkisar dari 27-58 (poor rock-fair rock). Hasil dari analisis kestabilan lereng highwall dengan tinggi lereng pit 100 meter dengan kodisi muka air tanah alami diperoleh nilai faktor aman (FS) dari 0,729 sampai 1,018 yang artinya lereng berada pada kondisi labil pada semua kemiringan lereng (Gambar 2.10).

Pada kondisi penurunan muka air tanah (dewatering) diperoleh faktor keamanan (FS) dari 0,858 sampai 1,250. Lereng ini berada pada kondisi kritis pada kemiringan lereng 250 -300. Namun lereng berada dalam kondisi labil pada kemiringan lereng 300 -50. Analisis stabilitas lereng akibat hujan deras yang

melanda di tepi ruas jalan Liwa -Simpang Gunung Kemala STA.263+650 Lampung telah dianalisis oleh Setyanto dkk. (2016) menggunakan Plaxis V.8.2. Ruas jalan Liwa – Simpang Gunung Kemala terletak di wilayah TNBBS Lampung yang memiliki kondisi geografis yang terdiri dari perbukitan serta terdapat lereng dan jurang yang cukup tinggi, curam yang rawan mengalami kelongsoran akibat hujan deras.



Gambar 2.10 Perbandingan nilai FS dan kemiringan lereng (Modifikasi Nurhidayat dkk., 2016)

Program ini merupakan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga dapat dengan cepat membuat model geometri dan jaring elemen berdasarkan penampang melintang dari kondisi lereng yang akan dianalisis (*PLAXIS*, 2012).

Pada penelitian ini didapat hasil running dari *PLAXIS.* Pada potongan lereng deformasi yang terjadi sebesar 1601×10^{-3} m, semakin besar nilai deformasi maka kemungkinan terjadi kelongsoran semakin besar akibat deformasi tanah yang terjadi pada lereng secara vertikal maupun horizontal. Besarnya deformasi yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya sudut kemiringan lereng dan level muka air tanah lereng.

2.4.3. Analisa Stabilitas Lereng dengan Metode *Morgenstern – Price (MP)*

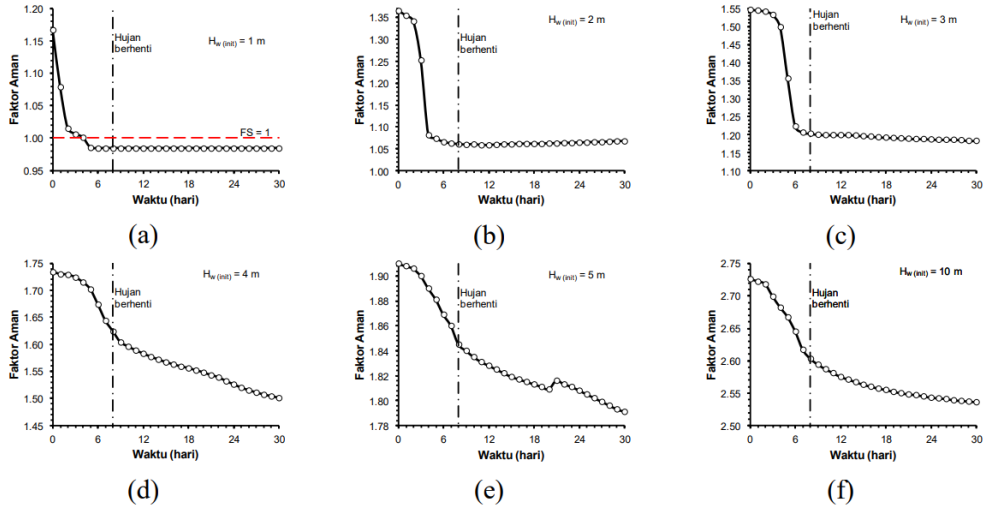
Berdasarkan penelitian (Agus Setyo Muntohar dan Rio Indra Saputro) pada judul penelitian "Pengaruh Kedalaman Muka Air Awal Terhadap Analisis Stabilitas Lereng Tak Jenuh" model analisis transient dimana tekanan air pori awal dibangkitkan dari muka air tanah dilakukan dalam interval waktu 1 hari selama 30 hari. Pada penelitian ini, kondisi muka air tanah awal divariasikan 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, dan 10 m. Untuk mengetahui pengaruh muka air tanah terhadap perubahan tekanan air pori dan stabilitas lereng, ditinjau dari 3 titik di masing-masing potongan yaitu di bagian atas bidang keruntuhan (A), di tengah bidang keruntuhan (B), dan di kaki bidang keruntuhan (C).

Analisis stabilitas lereng dimodelkan dengan SLOPE/W (Geoslope International, 2007b) yang didasarkan pada konsep keseimbangan batas (limit equilibrium). Stabilitas lereng dihitung dengan menggunakan metode *Morgenstern – Price (MP)* dimana bidang keruntuhan lereng telah ditentukan (*fully-specified slip surface*). Kondisi ini memudahkan penghitungan faktor aman lereng untuk setiap interval waktu yang diberikan.

Variasi faktor aman (FS) lereng terhadap waktu hujan untuk berbagai kedalaman muka air tanah awal ditunjukkan pada Gambar 2.7 Hasil ini menunjukkan bahwa kedalaman muka air tanah mempengaruhi faktor aman awal (FS(t = 0)) dan faktor aman minimum yang terjadi selama hujan. Semakin dekat kedalaman muka air tanah ke permukaan lereng, faktor aman awal yang diperoleh semakin rendah.

Kondisi disebabkan oleh infiltrasi air hujan yang menyebabkan permukaan tanah menjadi jenuh air. Sebagai akibatnya akan meningkatkan kedalaman zona pembasahan (*wetting zone*) dan pengurangan suction atau peningkatan tekanan air pori. Kondisi ini terjadi untuk $H_{w(init)}$ = 1 m, 2 m, dan 3 m yang ditunjuukkan pada Gambar 2.11 a hingga 2.11 c, dimana faktor aman (FS) berkurang secara drastis pada aktu mendekati berakhirnya hujan, dan setelahnya tidak terjadi perubahan faktor aman yang sangat kecil. Faktor aman minimum yang terendah dicapai pada kondisi $H_{w(init)}$ = 1 m. Hal ini dapat disebabkan oleh peningkatan muka air tanah secara cepat yang memperbesar tekanan air pori pada lereng. Sedangkan untuk $H_{w(init)}$ = 4 m, 5 m, dan 10 m (Gambar 2.11 d hingga 2.11

f), faktor aman masih cenderung berkurang walaupun hujan telah berhenti hingga waktu 30 hari.



Gambar 2. 11 Perubahan faktor aman lereng terhadap waktu untuk berbagai kondisi muka air taah awal ($H_{w(int)}$) (a) ($H_{w(int)}$) = 1 m (b) ($H_{w(int)}$) = 2 m (c) ($H_{w(int)}$) = 3 m (d) ($H_{w(int)}$) = 4 m(e) ($H_{w(int)}$) = 5 m (f) ($H_{w(int)}$) = 10 m (Agus Setyo Muntohar, 2015)

Secara umum infiltrasi air hujan akan menyebabkan permukaan tanah menjadi jenuh air. Kondisi ini akan meningkatkan kedalaman zona pembasahan (wetting zone) dan pengurangan suction. Simulasi numerik pada lereng di area Kalibawang, Kulonprogo, D.I. Yogyakarta terhadap variasi kedalaman muka air tanah awal memberikan kesimpulan sebagai berikut : Semakin dekat kedalaman muka air tanah ke permukaan lereng, faktor aman awal yang diperoleh semakin rendah.

2.5. Penurunan Segera (*Immediate Settlement*) pada Timbunan

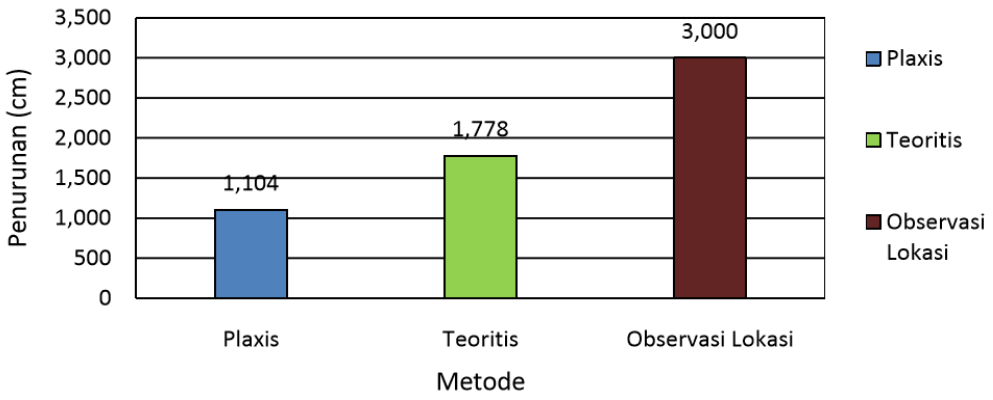
Perkembangan teknologi sekarang ini telah memunculkan struktur yang rumit. Perhitungan dengan menggunakan metode eksak tidak memungkinkan untuk digunakan pada struktur dengan kompleksitas yang rumit. Hal ini dikarenakan penyelesaian eksak hanya dapat diperoleh untuk kasus yang sederhana.

2.5.1. Penurunan pada Timbunan

Pada Penelitian Agung Prakoso, dkk (2019) dimana penelitian tersebut untuk analisis terhadap penurunan segera (*immediate settlement*) tanah timbunan berjenis silt pada proyek pembangunan jalan nasional Ruas Giriwoyo-Duwet, Wonogiri, Jawa Tengah dengan membandingkan hasil analisa perhitungan secara teoritis, hasil analisa software Plaxis dengan data uji sepuluh sampel tanah dan pengamatan langsung di lokasi.

Tujuan dari analisis ini untuk mendapatkan gambaran besar penurunan yang terjadi pada tanah timbunan akibat penurunan segera dari hasil analisis tiga metode yang dilakukan.

Hasil perhitungan penurunan dilakukan perbandingan tiga metode pada sampel tanah uji I3 atau pada STA 3+795 dengan menggunakan metode perhitungan plaxis, teoritis, dan observasi lokasi dan di dapat hasil perbandingan selisih antara analisa plaxis dengan teoritis sebesar 0,674 cm dan plaxis dengan observasi lokasi terjadi selisih sebesar 1,896 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12



Gambar 2. 12 Analisa Besar Penurunan (Juan Arden Lacando, 2015)

Pada penelitian yang lainnya dipaparkan Juan Arden Lacando (2015) dimana hasil dari penelitian menyimpulkan variasi Pembebanan (Tanah lapangan) Dari hasil hubungan muka air tanah, faktor keamanan dan penurunan maka di ambil satu patokan penurunan terbesar yaitu pada muka air tanah 3 m lalu dibuat hubungan antara pembebanan, faktor keamanan, dan penurunan.

Dari hasil running simulasi dengan menggunakan program Plaxis v.8.2 untuk contoh pemodelan ini di dapat hubungan antara beban, faktor keamanan dan penurunan (tanah lapangan). Yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 9 Hubungan Antara Beban, Faktor Keamanan dan Penurunan pada Muka Air Tanah 3 m (Tanah Lapangan)

Beban (KN/m^2)	Msf	Uy (m)
5	1.038	0.01036
10	1.006	0.02544
15	0.996	0.16111
20	0.995	3.28

Sumber : Juan Arden Lacando (2015)

Berdasarkan Tabel 2.9 Semakin besar beban maka semakin kecil faktor keamanan (Msf). Dengan faktor keamanan terbesar 1.038 pada beban 5 KN/m^2 dan terkecil 0.995 pada beban 20 KN/m^2. Sedangkan semakin besar beban maka semakin besar penurunan (Uy) dengan penurunan terbesar 3.28 m pada beban 20 KN/m^2 dan terkecil 0.01036 m pada beban 5 KN/m^2.

2.6. Program Bantu

2.6.1. Program Geostudio

Geo-slope adalah suatu program dalam bidang geoteknik dan modeling geo-environment yang dibuat oleh Geo-slope Internasional, Kanada pada tahun 2002.

Program Geo-slope ini sendiri terdiri dari Slope/W, Seep/W, Sigma/W, Quake/W, Temp/W, dan Ctran/W yang mana satu sama lainnya saling berhubungan sehingga dapat dianalisa dalam berbagai jenis permasalahan dengan memilih jenis program yang sesuai untuk tiap – tiap masalah yang berbeda. Pengertian untuk tiap program tersebut, sebagai berikut :

1. Slope/W adalah suatu software untuk menghitung faktor keamanan dan stabilitas lereng.
2. Seep/W adalah suatu software untuk meneliti rembesan bawah tanah.

3. Sigma/W adalah suatu software untuk menganalisa tekanan geoteknik dan masalah deformasi.
4. Quake/W adalah suatu software untuk menganalisa gempa bumi yang berpengaruh terhadap perilaku tanggul, lahan, kemiringan lereng.
5. Temp/Wadalah suatu software untuk menganalisa masalah geotermal.
6. Ctran/W adalah suatu software yang dapat digunakan bersama dengan Seep/W untuk model pengangkutan zat – zat pencemar.

Slope/W adalah program yang memiliki kualitas ketajaman gambar 32-bit, *software* gratis yang beroperasi di bawah *Microsoft Windows*. Dengan lingkungan aplikasi windows yang sangat dikenal banyak orang dengan konsep yang simple dan dinamis, maka dimungkinkan setiap orang dengan mudah belajar dan menggunakan *Slope/W* baik secara tutorial maupun aplikatif.

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*.

Dari hasil akhir program *Slope/W* dapat diketahui besar nilai faktor keamanan suatu lereng dan mengetahui kondisi stabilitas lereng yang ada, sehingga diharapkan dapat menyelesaikan masalah-masalah geoteknik yang berhubungan dengan kestabilan tanah atau lereng, terutama pada bidang pertanian.

2.6.2. Program *PLAXIS*

Program *PLAXIS* merupakan program komputer finite element yang digunakan untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas untuk berbagai kasus pada geoteknik. Kondisi yang sebenarnya bisa digambarkan baik kasus geoteknik. Kondisi yang sebenarnya bisa digambarkan baik dengan model *plane strain* maupun dengan model *axisymmetric* .

Analisis Pemodelan pada plaxis. *PLAXIS* menyajikan beberapa pemodelan untuk mensimulasikan beberapa tingkah laku dari tanah. Pemodelan-pemodelan tersebut adalah permodelan linear Elastic, pemodelan mohr-coulomb, pemodelan jointed rock, pemodelan hardening soil, pemodelan soft soil, pemodelan soft soil creep, pemodelan user defined soil. Pemodelan ini meliputi lima parameter yaitu Young's modulus (E), Poisson's ratio(ν), kohesi(c), sudut geser(Ø), dan sudut dilatansi (ψ).

“Halaman ini sengaja dikosongkan “

BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1. Uraian Umum

Penelitian ini dilakukan dengan melakukan analisa data sekunder dari peneliti terdahulu dengan beberapa tahap kegiatan. Tahapan pelaksanaan tersebut yaitu mengumpulkan data sekunder serta melakukan pemetaan data penelitian terdahulu.

Penelitian ini bersifat pemodelan dan tujuan penelitian ini untuk mengetahui faktor keamanan dari beberapa konfigurasi geometri tanggul dengan menggunakan program bantu Geostudio yaitu ketinggian 3 m, 5 m, dan 7 m serta kemiringan 1:1, 1:1,5, dan 1:2 dengan variasi muka air tanah (M.A.T) 0 m dan -30 m dan variasi endapan lumpur dengan tebal endapan 1 m, 2 m, dan 3m. Pada pemodelan ini mempertimbangkan pengaruh nilai suction pada *SWCC*. Selain itu juga penelitian ini bertujuan untuk mencari besarnya pemampatan segera dengan menggunakan program bantu *PLAXIS.*

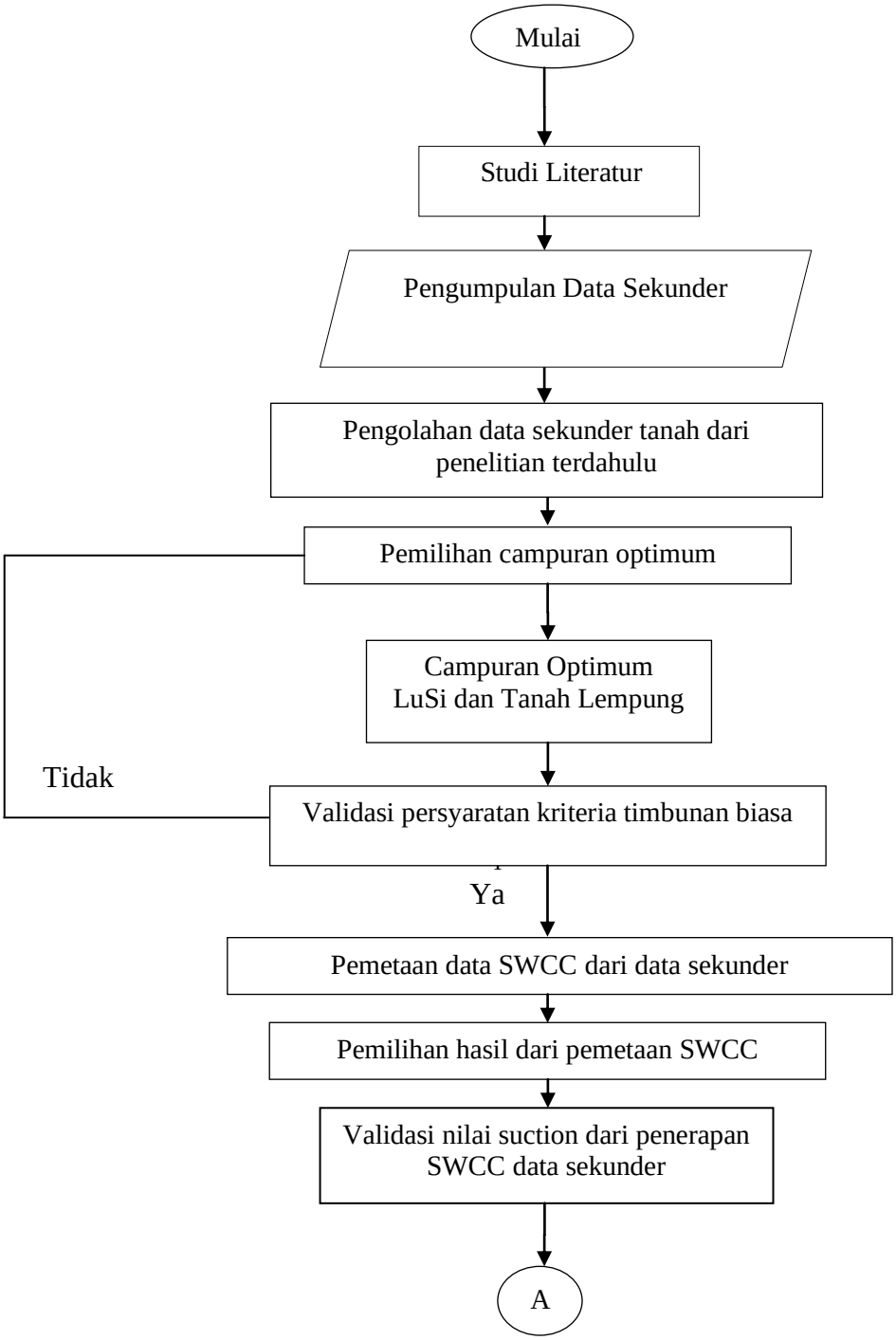
Data campuran material yang digunakan didapatkan dari data sekunder di mana terpilih prosentase campuran optimum yaitu 20% Lumpur Sidoarjo dan 80% tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya.

Pada penelitian ini, penulis akan menganalisis perubahan nilai faktor keamanan yang terjadi pada tanggul akibat beberapa variasi pemodelan tanggul yaitu:

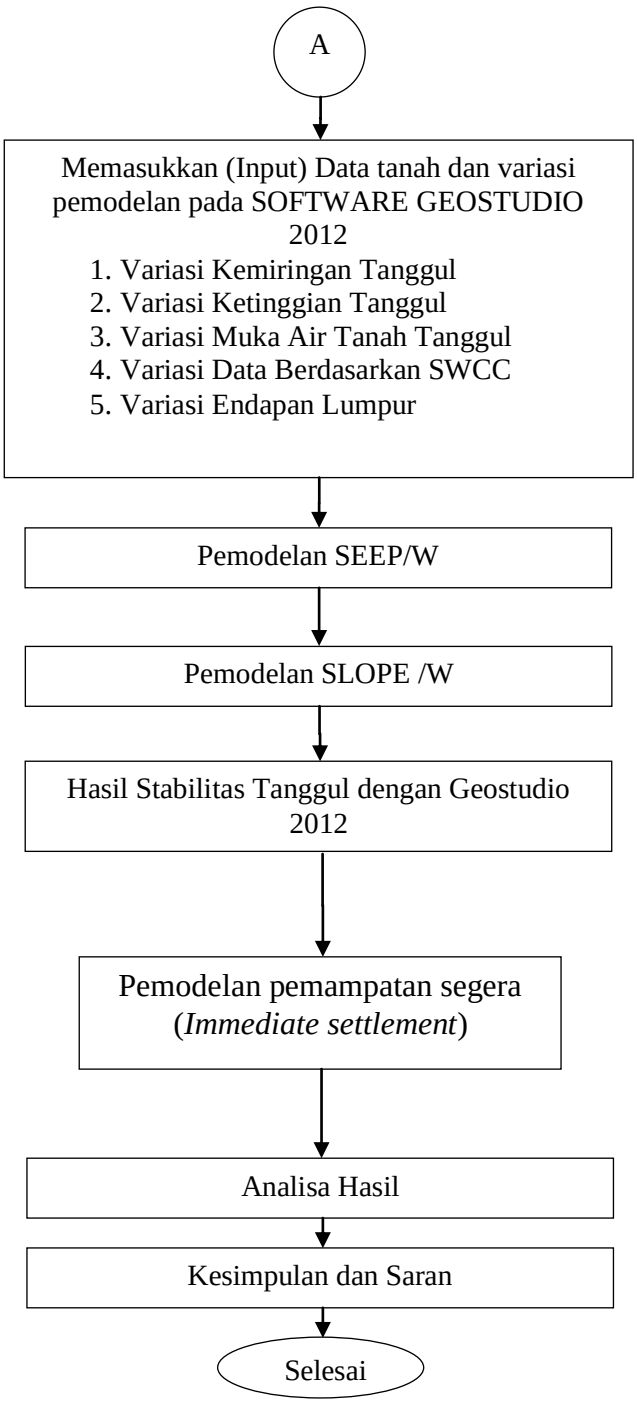
1. Variasi kemiringan tanggul
2. Variasi ketinggian tanggul
3. Variasi muka air tanah pada tanggul
4. Variasi endapan Lumpur

3.2. Bagan Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini ditunjukan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Bagan Alir



Gambar 3. 2 Bagan Alir (Lanjutan)

3.3. Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri atas data dari penelitian terdahulu yaitu campuran optimum tanah lempung ditambahkan dengan Lumpur Sidoarjo. Dimana alur penelitian, meliputi :

1. Studi Literatur

Proses tahapan awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang diperlukan untuk mengerjakan penelitian. Data-data tersebut berupa data penunjang yaitu studi literatur dan studi penelitian sebelumnya serta data primer yang berupa data tanah dari lokasi penelitian dan data bahan campuran.

2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan untuk perencanaan ini adalah data sekunder dengan rincian sebagai berikut :

a. Data SWCC dan data tanah untuk campuran LuSi dan tanah lempung dari penelitian terdahulu.
b. Data penyelidikan tanah dasar DB -01(Lampiran 3)

3. Parameter Tanah dan Korelasi Data Tanah

Pemilihan parameter data tanah untuk timbunan digunakan beberapa korelasi untuk melengkapi data dari penelitian terdahulu. Dalam pengolahan data tanah tersebut menggunakan tabel dan grafik korelasi. Koefisien rembesan tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu: kekentalan cairan, distribusi ukuran-pori, distribusi ukuran-butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah dan derajat kejenuhan tanah.

Harga koefisen rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah berbeda-beda. Berikut merupakan beberapa harga koefisien rembesan :

Tabel 3. 1 Koefisien Rembesan (k) Berdasarkan Tipe Tanah

Jenis tanah	*k*	
	cm/ detik	ft/ menit
Kerikil bersih	1.0 – 100	2.00 – 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	Kurang dari 0.000001	Kurang dari 0.000002

Sumber: Das, 1985

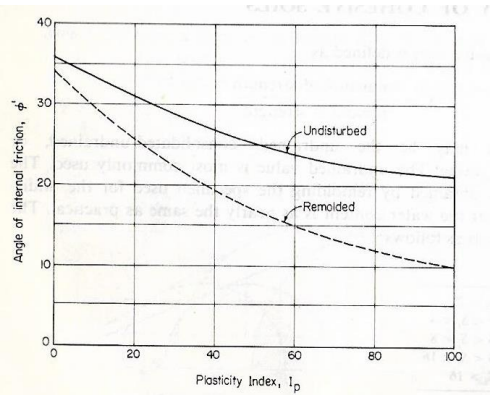
Pemilihan parameter data tanah untuk timbunan digunakan beberapa korelasi untuk melengkapi data dari penelitian terdahulu. Dalam pengolahan data tanah tersebut menggunakan tabel dan grafik korelasi.

Tabel 3. 2 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Macam Tanah	E (Kg/cm^2)
LEMPUNG	
• Sangat Lunak	3 – 30
• Lunak	20 – 40
• Sedang	45 – 90
• Berpasir	300 – 425
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

Tabel 3.2 memberikan rentang nilai modulus elastisitas E yang mungkin diperoleh, namun dapat diperhatikan bahwa rentang nilai E tersebut terlalu besar. Dengan ini berbagai nilai pembaca tidak harus mencoba untuk menggunakan "rata-rata" nilai-nilai dari tabel ini untuk desain, tapi bisa digunakan sebagai kontrol perkiraan dalam menentukan modulus elastisitas E.



Gambar 3. 3 Hubungan Indeks Plastistas dan Sudut Geser (Bowles, 1997)

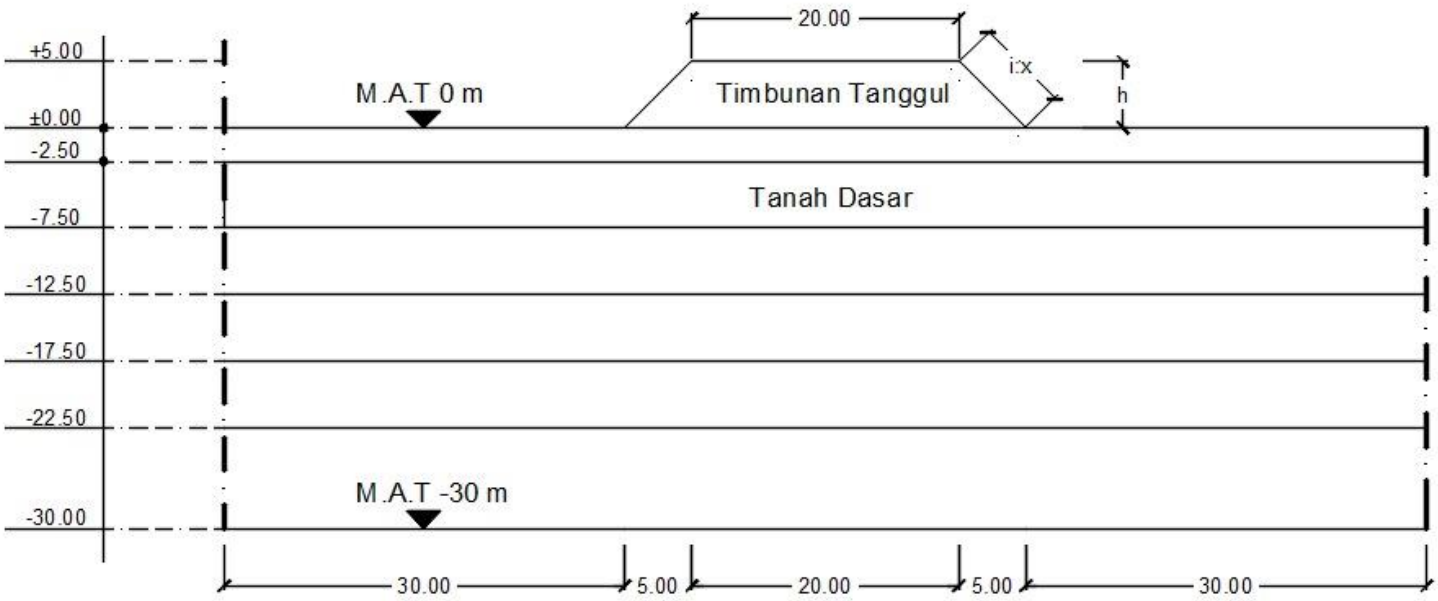
Tabel 3. 3 Hubungan Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam (Ø)
Kerikil kepasiran	35° – 40°
Kerikil kerakal	35° – 40°
Pasir padat	35° – 40°
Pasir lepas	30°
Lempung kelanauan	25° – 30°
Lempung	20° – 25°

Sumber: Buku Mekanika Tanah, Braja M.Das Jilid 1

4. Variasi Pemodelan untuk SEEP / W dan SLOPE /W

a. Pemodelan Muka Air Tanah



Gambar 3. 4 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)

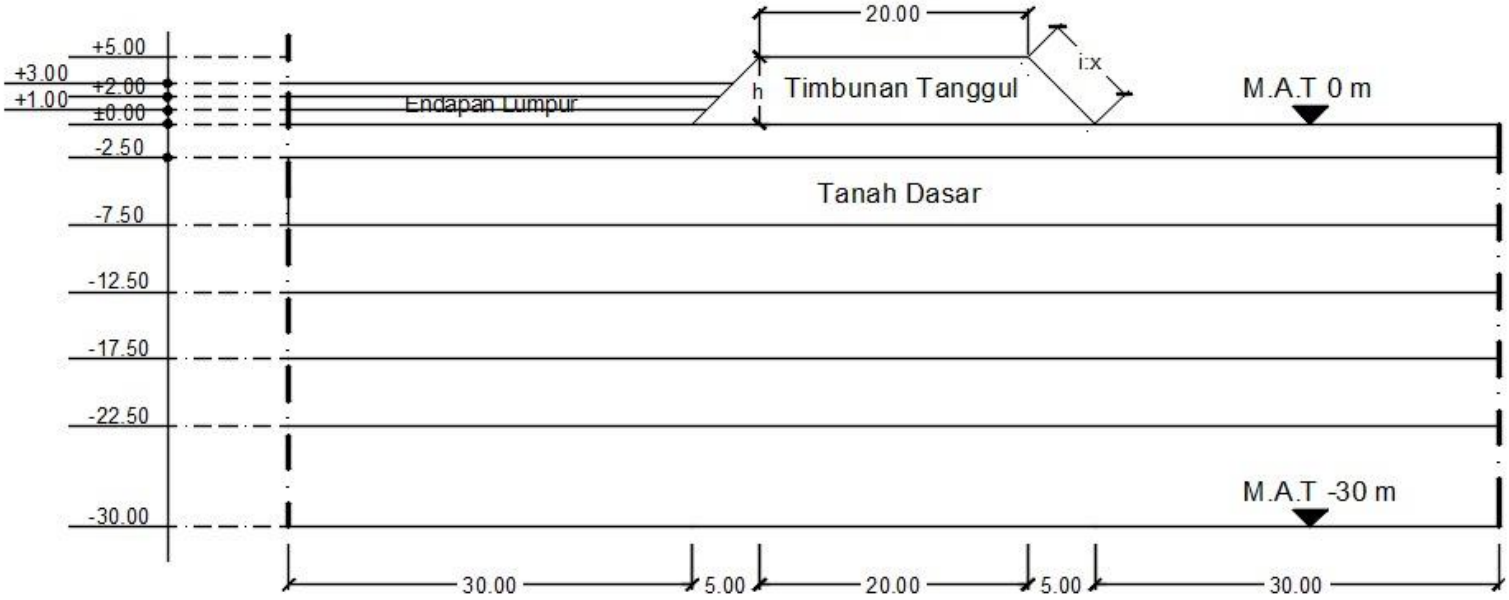
Keterangan

h : Tinggi tanggul = 3 m , 5 m, dan 7 m

x : Kemiringan tanggul = 1 : 1, 1,5, dan 2

Untuk menganalisa perubahan nilai faktor keamanan pada saat muka air tanah (M.A.T) 0 meter dan -30 meter dengan variasi kemiringan yaitu 1:1, 1:1,5, dan 2 serta ketinggian 3 m, 5 m, dan 7 m. Pemodelan tanggul menggunakan program bantu Geostudio SLOPE/W dan SEEP/W. Perhitungan nilai faktor keamanan dengan SLOPE/W akan dilakukan dengan mencari nilai faktor keamanan paling aman. Sedangkan SEEP/W digunakan untuk melihat pengaruh suction pada pemodelan tanggul.

b. Pemodelan Endapan Lumpur



Gambar 3. 5 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum dengan Variasi Endapan Lumpur

Keterangan

h : Tinggi tanggul = 3 m , 5 m, dan 7 m

x : Kemiringan tanggul = 1 ; 1,5 dan 2

y : Endapan lumpur = 1 m , 2 m dan 3 m

Gambar 3.5 adalah ilustrasi gambar pemodelan untuk menganalisa perubahan nilai faktor keamanan pada endapan lumpur dengan ketinggian yang berbeda yaitu 1 m,2 m, dan 3. Dalam pemodelan juga menggunakan variasi kemiringan yaitu 1 ; 1,5 dan 2 serta ketinggian 3 m , 5 m, dan 7 m.

“Halaman ini sengaja dikosongkan “

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penentuan Prosentase Campuran Optimum dari Data Sekunder

Penentuan prosentase optimum ini dilakukan dengan meninjau data tanah sekunder penelitian terdahulu. Berdasarkan beberapa data yang dianalisa, didapatkan data penelitian campuran optimum yaitu data campuran optimum Lumpur Sidoarjo (LuSi) dan tanah lempung, Kertajaya Indah Surabaya, Jawa Timur.

Hasil plastisitas LuSi kondisi initial memiliki plastisitas cukup tinggi (LL= 59 % dan IP = 33,57 %). Hasil beberapa prosentase campuran LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya pada data sekunder dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 4. 1 Prosentase Penurunan Nilai Liquid Limit (LL)

Tanah Lempung + Lumpur Lapindo	**Kadar Campuran**					
	Asli	**5%**	**10%**	**15%**	**20%**	**25%**
LL(*Liquid Limit*)%	59	54	52	41	35	31
Penurunan LL(%)		8,47	11,86	30,51	40,68	47,46

Sumber : Gati Sri U, 2015

Berdasarkan Tabel 4.1 menunjukkan perilaku plastisitas LuSi yang dicampur dengan tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya dengan beberapa prosentase penambahan Lumpur Lapindo 0 %, 5%, 10 %, 15%, 20%, dan 25%. Pada nilai penambahan lumpur 25 % terjadi penurunan yang sangat besar pada nilai *Liquid Limit* (LL) . Penurunan nilai LL terjadi mulai dari kondisi initial LuSi sampai prosentase penambahan 25 % setelah dicampur dengan tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya.

Tabel 4. 2 Prosentase Penurunan Nilai Indeks Plastisitas(IP)

Tanah Lempung + Lumpur Lapindo	**Kadar Campuran**					
	Asli	**5%**	**10%**	**15%**	**20%**	**25%**
*Indeks Plastisitas(*IP*)*	33,57	27,08	23,01	18,25	14,49	11,48
Penurunan IP(%)		19,33	31,46	45,64	56,84	65,80

Sumber : Gati Sri U, 2015

Prosentase penurunan nilai LL dan IP paling besar terjadi pada campuran 25% lumpur lapindo, yaitu 47.46% dan 65.80% dari tanah asli. Pada Tabel 4.1 dan 4.2 pada penelitian tersebut diambil data campuran optimum untuk digunakan sebagai pemodelan bahan material tanggul yaitu penambahan LuSi dengan prosentase campuran 20%. (Gati Sri U, 2016)

4.1.1. Pemeriksaan Nilai Spesifikasi Timbunan Biasa dengan SNI pada Campuran LuSi dan Tanah Lempung

Menurut Peraturan, PUPR syarat timbunan biasa sebagai berikut :

- **Campuran 80% (Tanah lempung Kertajaya Indah, Surabaya) dan 20%(Lumpur Sidoarjo)**

Berdasarkan Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO dan hasil pengujian batas cair (LL) dan indek plastisitas (PI) yang diplotkan dengan diagram plastisitas, campuran optimum LuSi dan tanah lempung masuk dalam klasifikasi A-4 (Tabel 4.3) yaitu lempung lanau dengan plastisitas rendah.

Sedangkan klasifikasi Tanah Sistem USCS berdasarkan hasil batas cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) termasuk pada kelompok CL-ML yaitu lanau tak organik, lempung kepasiran dengan plastisitas rendah.

Tabel 4. 3 Penentuan Spesifikasi Jenis Timbunan

Jenis Pemeriksaan	20% Lusi + 80% Tanah Lempung (GATI SRI U, 2016)	Satuan	Hasil PEMERIKSAAN
LL	35	%	Memenuhi Persyaratan TIMBUNAN BIASA
PL	20,4	%	
IP	14,6	%	
AASHTO	A-4	-	
USCS	CL-ML	-	

Sumber : Analisa Data Sekunder

Berdasarkan Tabel 4.3 didapatkan hasil bahwa campuran Lusi dan tanah lempung Kertajaya Indah memenuhi persyaratan sebagai timbunan biasa berdasarkan spesifikasi peraturan timbunan biasa.

4.2. Penentuan SWCC (*Soil Water Characteristic Curve)* dari Data Sekunder

Setiap material penyusun tanggul memiliki kemampuan menyerap air (suction) yang berbeda-beda. Untuk itu perlu diketahui kemampuan menyerap air dari tiap jenis tanah penyusun tanggul dengan penerapan parameter *Soil water characteristic curve* (SWCC) menggunakan program bantu Geostudio.

SWCC merupakan kurva yang menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan suction tanah (L'Heurux, 2005). Jumlah air tersebut diartikan sebagai volumetric water content (θ_w), kadar air gravimetric (w), atau derajat kejenuhan (S). SWCC juga digambarkan sebagai retention curve atau volumetric water content curve yang menggambarkan kemampuan tanah untuk menyimpan dan melepaskan air.

4.2.1. Pemetaan Data Sekunder terhadap *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)

Tahap selanjutnya yaitu pemetaan data sekunder terhadap nilai dari *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). Hal tersebut dilakukan karena tidak semua data sekunder penelitian terdahulu mecantumkan nilai dari SWCC. Maka dari itu, melakukan pemetaan data sekunder dilakukan dengan melihat nilai parameter fisik dan klasifikasi tanah yang mendekati data sekunder campuran optimum LuSi

dan tanah lempung Kertajaya Indah Surabaya. Dari hasil pemetaan data sekunder didapatkan campuran paling optimum yaitu data sekunder dari tanah Pulau Dalam, dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Pemetaan Parameter Fisik dan Klasifikasi Tanah terhadap *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)

JENIS PENGUJIAN	TANAH PULAU DALAM
a. Volumetri dan Gravimetri	
- Spesifik Gravity, Gs	2,62
- Berat Volume Tanah, γ_t	-
- Berat Volume Kering, γ_d	-
- Kadar Air Optimum, Wc_{opt}	-
- Angka Pori, e	-
- Derajat Kejenuhan, Sr	-
- Distribusi ukuran butiran	
Pasir	46
Gravel	18
Lanau	26
Lempung	10
b. Konsistensi	
- Liquit Limit (LL)	27
- Plastic Limit (PL)	17
- Plasticity Index (PI)	10
- Activity (A)	-
c. Klasifikasi Tanah	
- USCS (Unified Soil Classification System)	CL
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials Classification)	A-7-5
d. Triaksial	
- Ø	-
- c	-
e. Daya Dukung	
- Kuat Tekan (Unconfined Compression Test)	-
- CBR *(California Bearing Ratio)*	-

Sumber: Muhammad Yusof, 2016

Muhammad Yusof, 2016 melakukan penelitian tentang tanah Pulau Dalam, Malaysia yang berklasifikasi plastisitas rendah, pengklasifikasian tanah menurut AASTHO yaitu A-7-5. Sedangkan, pengklasifikasian menurut USCS yaitu tergolong CL ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Hasil Penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 medapatkan hasil uji sifat fisik yang dilakukan pada tanah Pulau Dalam yaitu: analisa saringan, plastisitas (batas cair dan batas plastis), dan specific gravity (Gs). Hasil analisa saringan, butiran tanah Pulau Dalam merupakan tanah pasir dimana hasil analisa saringan terbesar yaitu pasir 42 % dan memiliki plastisitas rendah (LL = 27 % dan IP = 10 %). Berdasarkan hasil spesifik gravity (G_s) yaitu 2,62.

Hasil sifat fisik dan mekanik pada tanah Pulau Dalam ini mendekati data sekunder campuran optimum LuSi dan tanah lempung, maka data tersebut dapat digunakan sebagai data sekunder untuk pemetaan SWCC penelitian.

4.3. Penerapan SWCC *(Validasi Suction*) dengan Program Geostudio pada Pemodelan Tanggul

Pemodelan dengan Geo Studio SEEP/W dilakukan dengan menginput data dari SWCC, yang meliputi karakteristik tanah penyusun tanggul serta fungsi *hidrolik* dan *volumetric water content.*

1. Parameter Tanah Dasar untuk Pemodelan Tanggul

Pada pemodelan tanggul menggunakan suction dengan tahapan awal yaitu SEEP/W, parameter tanah dasar ditunjukkan pada Tabel 4.5 menunjukkan data tanah untuk 6 lapisan tanah dengan parameter yang berbeda dan kedalaman tanah dasar yaitu 30 meter. Pada parameter tanah dasar menggunakan material model *Saturated Only* dengan nilai *Saturated X-Conductivity* yang berbeda berdasarkan jenis dari lapisan tanah.

Tabel 4. 5 Input Data Tanah Dasar untuk Pemodelan SEEP/W

Parameter	**Satuan**	**Soil 1**	**Soil 2**	**Soil 3**	**Soil 4**	**Soil 5**	**Soil 6**
Umum							
Kedalaman	m	0-2,5	2,5-8,5	8,5-12,5	12,5-18,5	18,5-22,5	22,5-30
Tebal	m	2,5	6	4	6	4	7,5
Jenis Tanah	-	Lempung dan Lanau	Pasir	Lempung dan Lanau	Lempung dan Lanau	Lanau dan Pasir halus	Lanau dan Pasir halus
Material Model	-	*Saturated Only*	*Saturated Only*	*Saturated Only*	*Saturated Only*	*Saturated Only*	*Saturated Only*
Saturated X-Conductivity	m/sec	1,00E-08	0,0001	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-05
Ky'Ratio		1	1	1	1	1	1
Kx' Ratio	°	0	0	0	0	0	0
Sat. Vol Water Content	m^3/m^3	0	0	0	0	0	0
Mv	kPa	0	0	0	0	0	0

Sumber : Analisa Data Sekunder

Setelah memasukkan nilai parameter untuk tanah dasar dan timbunan tanggul yang dibutuhkan kemudian didalam pemodelan konfigurasi geometri tersebut divariasikan muka air tanah dan endapan lumpur. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perbedaan hasil beberapa variasi tanggul.

2. Parameter Data Timbunan untuk Pemodelan Tanggul

Pada pemodelan tanggul diperlukan parameter data timbunan berdasarkan data sekunder campuran optimum penelitian terdahulu yang telah dianalisa. Beberapa parameter data timbunan seperti pada Tabel 4.6 akan dimasukkan kedalam program geostudio, parameter data timbunan sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Input Data Timbunan untuk *Volume Water Content* Pada Pemodelan SEEP/W

Estimate Vol. Water Content			Keterangan
Sat. Vol Water Content	m^3/m^3	0,15	
Sample Material	-	Clay	
Min. Suction	-	1	*(sesuai data sekunder)*
Max. Suction	-	400	*(sesuai data sekunder)*
Saturated X-Conductivity	m/sec	1,00E-07	*(korelasi)*
Mv Ky'Ratio	kPa	0 1	*(korelasi)*
Kx' Ratio	°	0	

Sumber : Analisa Data Sekunder

Tahap selanjutnya yaitu memasukkan nilai parameter untuk data tanah dasar pada Tabel 4.5 dan data timbunan tanggul dan Tabel 4.6. Pada pemodelan Geostudio tersebut ditentukan titik entry dan exit untuk mengetahui hasil dari slip surface pada timbunan tanggul. Hal tersebut merupakan tahapan akhir dari pemodelan untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada timbunan tanggul.

Tabel 4. 7 Input Data Timbunan Estimate *Hydraulic Conductivity Function* untuk Pemodelan SEEP/W

Estimation Method	-	Van Genuchten
Vol. Water Content Fn	m^3/m^3	Clay W/C Function
Saturated Kx	m/sec	1,00E-07
Residual Water Content	m^3/m^3	0,30
Min. Suction	-	1
Max. Suction	-	400

Sumber : Analisa Data Sekunder

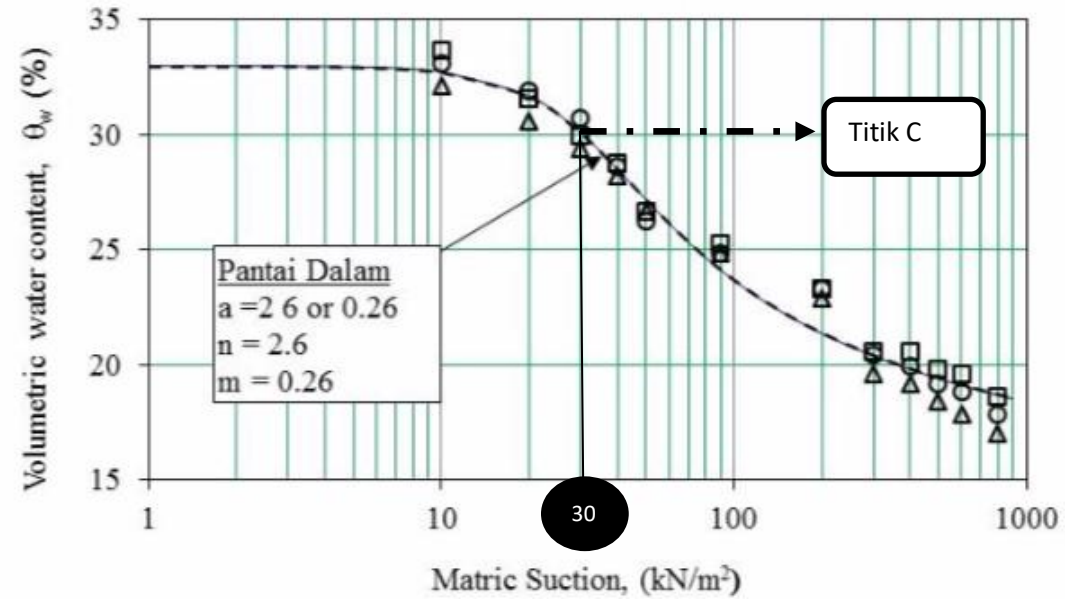
Tabel 4.6 merupakan data dari *volumetric water content* dan Tabel 4.7 adalah data *hydraulic conductivity function* yang akan dimasukkan pada parameter data tanah timbunan pada pemodelan Geostudio. Nilai residual, minimal, dan

maksimal suction didapatkan dari data sekunder campuran optimum. Sedangkan, untuk parameter yang lainnya didapatkan dari korelasi pada sub Bab 3.

Tekanan air pori pada kondisi campuran Lusi(20%) dan Tanah Lempung (80%) dapat diketahui dari data SWCC, dimana tegangan air pori ini sangat berpengaruh terhadap kestabilan tanggul

Tegangan air pori ini akan semakin meningkat seiring menjauhi muka air tanah dasar tanggul. Pada perhitungan tegangan air pori diambil validasi dari timbunan 7 meter, dimana pada ketinggian tanggul 7 meter yaitu kondisi faktor keamanan paling rendah. Sehingga untuk validasi nilai suction pada pemodelan maka, langkah pertama dengan plot pada grafik dengan mencari nilai suction berada, kemudian dikonversi menjadi meter untuk dicari dalam pemodelan.

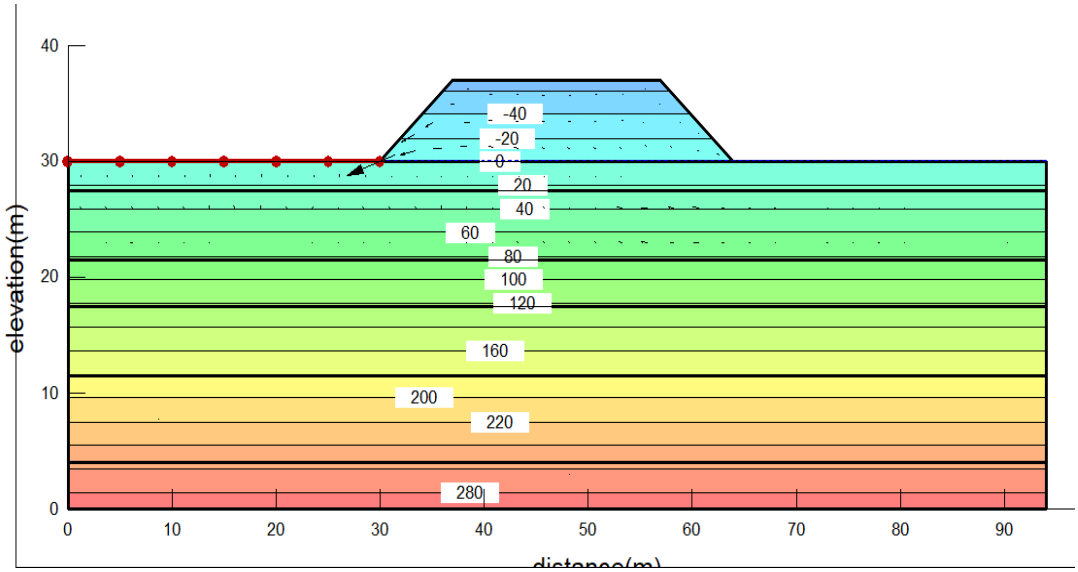
Menurut Indarto (1991) besarnya hisapan dari grafik yang dinyatakan dalam angka pF, bila akan dinyatakan dalam tegangan air pori negatif maka nilai tersebut harus dikonversikan kedalam kPa atau kg/cm^2. Berdasarkan Gambar 4.1 didapatkan nilai suction. Berdasarkan Grafik, Titik C= Posisi Suction= 30 Kpa= 0,3 Bar= 300 cm= 3 meter.



Gambar 4. 1 SWCC dari Tanah Pulau Dalam (Sumber: M.Yusof, 2016)

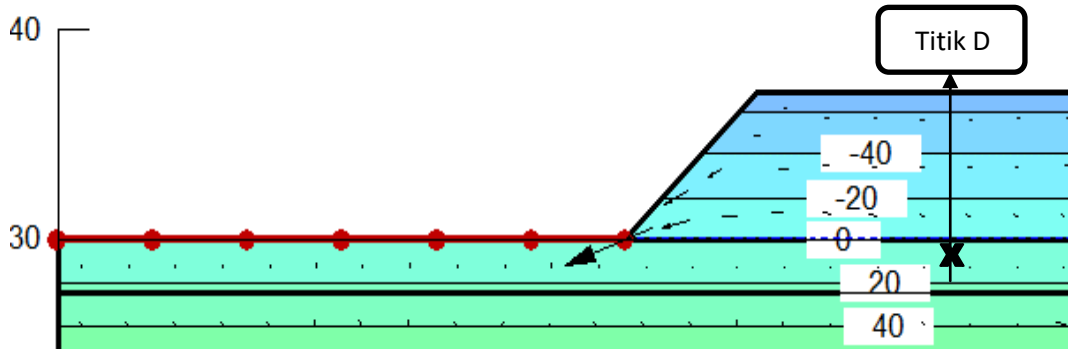
Validasi kebenaran model SWCC sesuai dengan hasil pemodelan SEEP/W bertujuan untuk mengetahui proses pemodelan sudah berjalan dengan baik serta untuk mengetahui posisi nilai suction yang sesuai dengan kurva. Nilai SWCC yang merepresentasikan nilai matric suction dan volumetric water content terdapat pada Gambar 4.1. Untuk masing-masing nilai suction pada Gambar 4.1 diuraikan pada sub Bab 2.3.2.

Pemeriksaan nilai suction bertujuan untuk mengetahui pengaruh nilai suction pada pemodelan tanggul. Validasi program ini juga dilakukan dengan cara menyelesaikan analisis stabilitas lereng dengan menggunakan program komputer dan selanjutnya dibandingkan dengan hasil dari analisis stabilitas lereng secara teoritis dilihat dari data kurva *SWCC*. Selanjutnya parameter SWCC diinputkan pada program Geostudio untuk parameter SEEP/W dan SLOPE/W.



Gambar 4. 2 Penampang Hasil Ouput SEEP/W untuk Nilai Suction.

Hasil penerapan (*Validasi Suction*) dengan Program Geostudio pada Gambar 4.2 menunjukkan perihal pemeriksaan pengaruh suction atau tegangan air pori negative terhadap tanggul, dari hasil pemeriksaan posisi suction tersebut didapatkan hasil bahwa pemodelan telah sesuai kurva grafik kurva SWCC.



Gambar 4. 3 Potongan Hasil Ouput (Letak Suction)

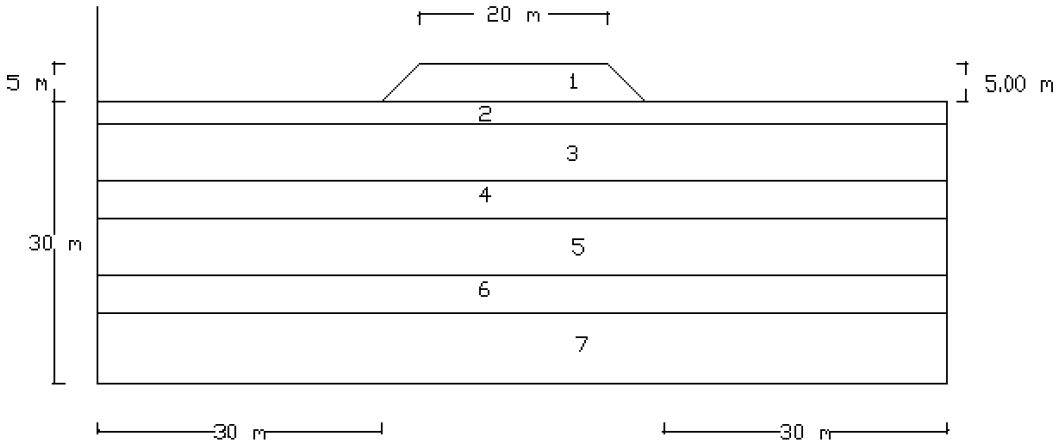
Pada tanah campuran optimum Lusi(20%) dan Tanah Lempung (80%) pada M.A.T 0 meter menunjukkan hasil bahwa letak suction untuk digunakan validasi adalah pada titik titik D (Gambar 4.3) yaitu 3 meter, dimana nilai suction yang didapatkan terletak tidak jauh dari muka air tanah (M.A.T) 0 meter.

4.4. Stabilitas Tanggul

Pada bab ini akan dipaparkan mengenai analisa tanggul terhadap beberapa variasi pemodelan menggunakan data tanah campuran optimum LuSi dan tanah lempung. Dalam menganalisa pemodelan menggunakan perangkat lunak, dimana perangkat lunak yang digunakan adalah :

1. Perangkat lunak SEEP/W untuk mengetahui rembesan pada tanggul berdasarkan variasi muka air tanah.
2. Perangkat lunak SLOPE/W untuk mencari nilai faktor keamanan (*factor of safety*) tanggul.

Tingkat kestabilan suatu lereng model tanggul didasarkan pada besarnya nilai faktor keamanan (FS) lereng model tanggul tersebut. Nilai faktor keamanan yang diambil adalah yang paling rendah dengan tujuan mengurangi resiko paling buruk yang akan terjadi pada model tanggul. Pada penelitian ini, perhitungan stabilitas lereng dilakukan dengan menggunakan *software* Geoslope *Slope/W*. Perhitungan dilakukan dengan metode keseimbangan batas dengan menggunakan metode *morgernstern-price*.



Gambar 4. 4 Geometri Pemodelan Tanggul

Salah satu geometri tanggul dengan tinggi tanggul = 5 meter, lebar tanggul adalah 20 meter, dan kemiringan = 1:1 ditunjukkan pada Gambar 4.4 dengan kedalaman tanah dasar yaitu 30 meter.

4.4.1. Data Sekunder Tanah Dasar

Parameter data sekunder tanah dasar yang digunakan untuk pemodelan stabilitas tanggul pada Geostudio. Kedalaman tanah dasar yaitu 30 meter dengan masing-masing nilai setiap kedalaman pada Tabel 4.8. Parameter data tanah dimasukkan pada parameter pemodelan untuk analisa hasil faktor keamanan tanggul.

Pada pemodelan tanggul menggunakan suction dengan tahapan awal yaitu SEEP/W dan dilanjutkan tahapan kedua yaitu SLOPE/W, diperlukan parameter tanah dasar seperti pada Tabel 4.8 yang dimana untuk lapisan tanah menggunakan material model Mohr-Coulomb dengan nilai γ, c, dan Ø yang berbeda berdasarkan jenis dari lapisan tanah.

Data tanah yang tersedia pada tanggul uji yaitu DB-01 (Lampiran 3). Data tanah dasar sebagai berikut :

Tabel 4. 8 Data Tanah Dasar Timbunan

Kedalaman (m)	**LL (%)**	**PL (%)**	**γ (gr/cm³)**	**Gs**	**e_o**	**Sr**	**c (kg/cm²)**	**Ø (°)**
2.0 – 2.5	26	48	1.51	2.55	2.01	100	0.09	-
8.0 – 8.5	19	29	1.70	2.58	1.26	100	0.10	32
12.0 – 12.5	27	48	1.42	2.55	2.70	100	0.07	-
18.0 – 18.5	42	104	1.34	2.55	3.55	100	0.10	8
22.0 – 22.5	28	56	1.42	2.59	2.78	100	0.10	-
28.0 – 28.5	32	44	1.80	2.61	1.02	100	0.2	36

Sumber: PPLS, 2018

Parameter tanah dasar digunakan untuk beberapa hasil analisa yang akan di dapatkan untuk pemodelan *PLAXIS*, dimana pemodelan pada PLAXIS hanya menggunakan tanah dasar divariasikan kondisi geometri tanggul.

Data tanah dasar dari data sekunder yang akan diinputkan berdasarkan masing-masing jenis lapisan pada tanah dasar sesuai Tabel 4.8. Pada pemodelan tanah dasar dan tanah timbunan digunakan program bantu SLOPE/W. Pemodelan tersebut didahului oleh tahap pemodelan Geostudio SEEP/W terlebih dahulu untuk memasukkan nilai suction. Tahap selanjutnya setelah memasukkan nilai parameter untuk tanah dasar pada Tabel 4.8 yaitu menentukkan titik entry dan exit untuk mengetahui hasil dari slip surface pada timbunan tanggul kemudian didalam pemodelan akan didapatkan angka keamanan.

Hal tersebut merupakan tahapan akhir dari pemodelan untuk mengetahui nilai faktor keamanan pada timbunan tanggul dengan beberapa variasi pemodelaan muka air tanah yaitu 0 m dan -30 meter serta variasi ketinggian endapan lumpur yaitu 1 m, 2 m, dan 3 m pada beberapa konfigurasi geometri tanggul.

4.4.2. Data Material Campuran LuSi dan Tanah Lempung, Kertajaya untuk Pemodelan Timbunan

Material timbunan yang digunakan berasal dari Lumpur Sidoarjo dan tanah lempung Kertajaya Indah. Berdasarkan penelitian Gati Sri U, 2016 didapatkan campuran optimum yaitu stabilisasi tanah lempung ruas jalan Kertajaya Indah Surabaya dengan campuran Lumpur Lapindo yang paling baik dan efektif adalah penambahan Lumpur Lapindo dengan prosentase 20%. Spesifikasi teknis dari material adalah sebagai berikut :

Tabel 4. 9 Rekapitulasi Data Campuran Optimum

Penelitian	**Variasi Campuran**	**Jenis Parameter**	**Hasil Uji**	**Satuan**
Gati Sri Utami (2015)	Lumpur Sidoarjo (20%)+Tanah Lempung (80%)	Berat Jenis (Gs)	-	
		Kadar Air	-	%
		γ_d	1,49	gr/cm^3
		Batas Cair(LL)	35	%
		Batas plastis(PL)	20,51	%
		Indeks Plastisitas (IP)	14,49	%
		Analisa Saringan		
		Lolos Saringan No.10	-	%
		Lolos Saringan No.40	-	%
		Lolos Saringan No.200	-	%
		Kohesi	0,395	kg/cm^2
		Sudut geser	5,76	°
		W_{opt}	-	%

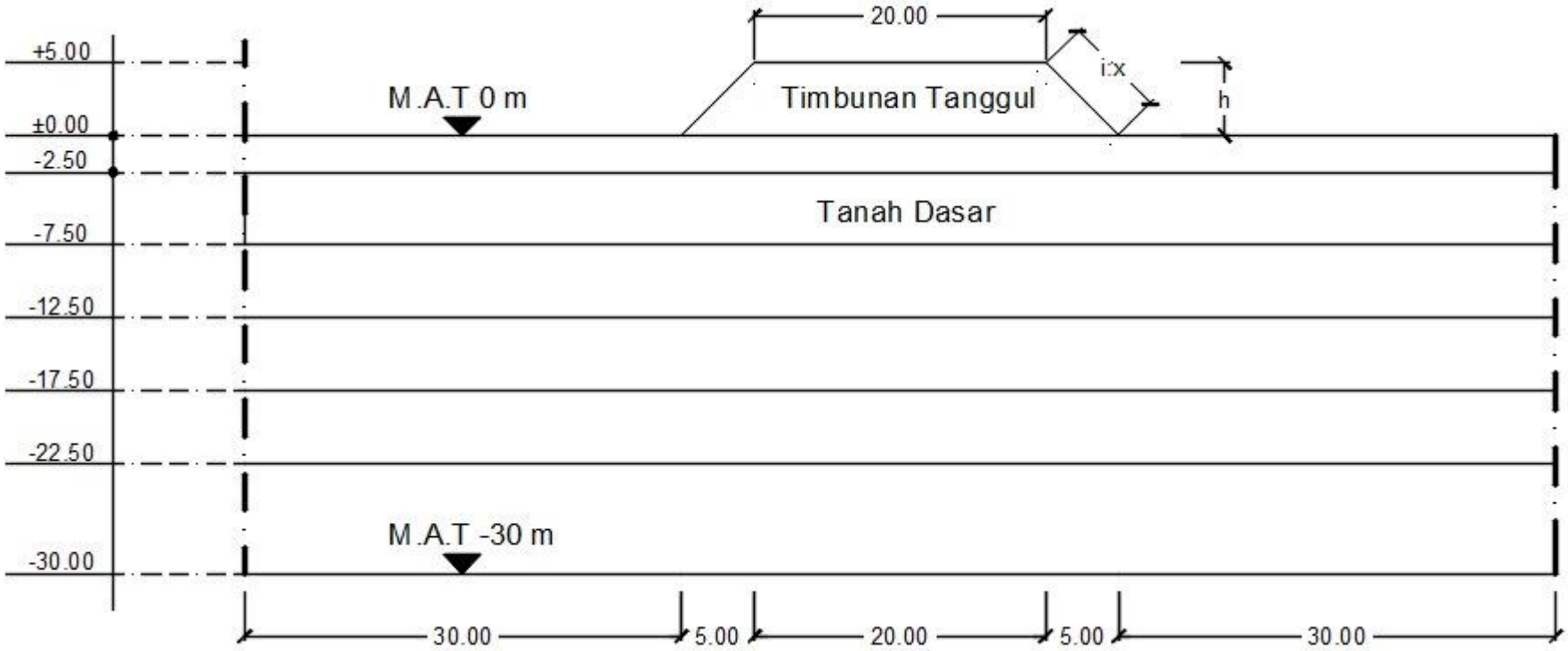
Sumber : Penelitian terdahulu

Pada penelitian ini, akan dilakukan analisa stabilitas timbunan dengan menggunakan sejumlah data-data tanah akan digunakan dalam perhitungan analisa stabilitas lereng dengan menggunakan Geoslope.

4.4.3. Pemodelan Variasi Muka Air Tanah (Campuran Lusi Dan Tanah Lempung, Kertajaya Indah)

1. Analisa Faktor Keamanan Tanggul Variasi Kemiringan dan Ketinggian Muka Air Tanah (M.A.T) 0 meter

Kondisi tanggul berada muka air tanah (M.A.T) 0 meter ditunjukkan pada Gambar 4.5 sebagai berikut,



Gambar 4. 5 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)

Adapun data-data parameter tanah berdasarkan hasil pengujian terdahulu dapat ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Data Parameter Tanah Tanggul

Parameter	Satuan	Tanah 1	Tanah 2	Tanah 3	Tanah 4	Tanah 5	Tanah 6
Basic							
γ_d	kN/m³	15,1	17	14,2	13,4	14,2	18
Cohesion	kPa	8,825985	9,80665	6,864655	9,80665	9,80665	19,6133
∅ (Phi)	°	0	32	0	8	0	36
Material Model	-	Mohr-Coulomb					

Sumber: Data Sekunder

Data parameter tanah dasar timbunan yang digunakan adalah data dari DB-01 (Lampiran 3) dan parameter data tanggul menggunakan data tanah yang didapatkan campuran optimum LuSi (20%) dan tanah Lempung, Kertajaya Indah (80%). Sedangkan untuk data SWCC yang digunakan menggunakan data SWCC dari Tanah Pulau Dalam, Malaysia (M.Yusof,2015).

Analisis kestabilan lereng dengan SLOPE/W dengan menggunakan parameter data tanah yaitu sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), dan berat volume tanah (γ) pada campuran tanah. Nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) yang digunakan dalam permodelan geoteknik ini adalah berdasarkan hasil pengujian *Triaxial Unconsolidated Undrained.*

Untuk menganalisa perubahan nilai faktor keamanan pada saat muka air tanah (M.A.T) 0 meter digunakan software Geostudio SLOPE/W. Perhitungan nilai faktor keamanan dengan SLOPE/W akan dilakukan dengan variasi ketinggian dan kemiringan.

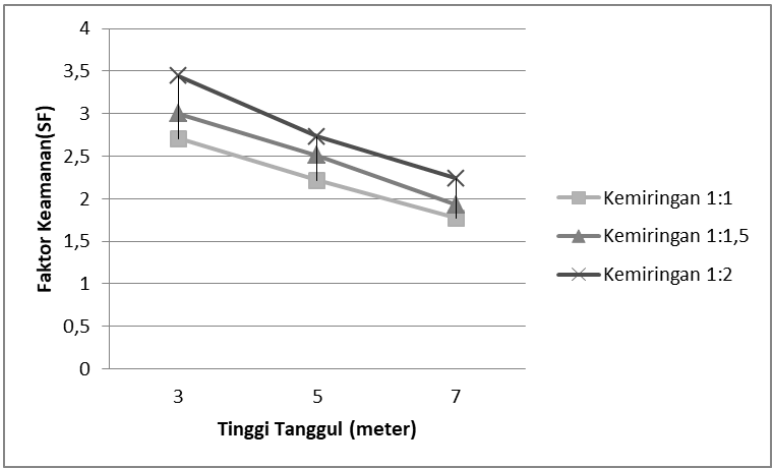
Tabel 4. 11 Hasil Pemodelan untuk Campuran Optimum M.A.T 0 Meter

NO	VARIASI		Hasil
	Ketinggian (meter)	Kemiringan	Faktor Keamanan (SF)
1	3	1:1	2,709
		1:1,5	2,999
		1:2	3,44
2	5	1:1	2,218
		1:1,5	2,51
		1:2	2,73
3	7	1:1	1,774
		1:1,5	1,93
		1:2	2,243

Sumber :Perhitungan

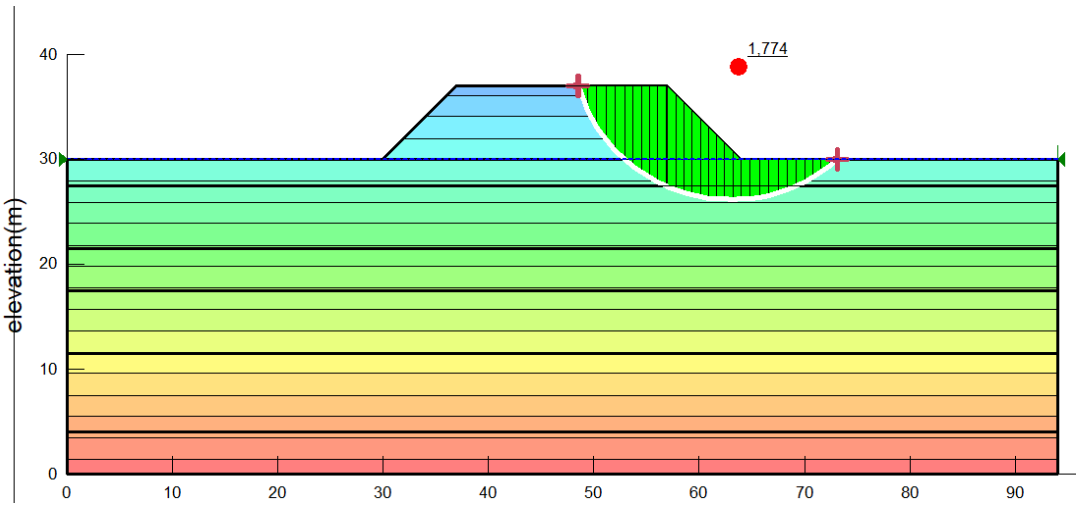
Dalam perhitungan faktor keamanan ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu adalah geometri model, muka air tanah, *slip surface*, dan parameter material. Geometri model lereng harus sesuai dengan geometri asli tanggul yang sebenarnya. Dalam perhitungan ini model material yang digunakan adalah model *Mohr Couloumb* sehingga parameter yang dibutuhkan hanya ada tiga, yaitu berat isi tanah, kohesi, dan sudut geser. *Slip surface* digunakan sebagai asumsi bidang kelongsorannya.

Pemodelan tanggul ini dilakukan untuk mengetahui keamanan stabilitas lereng dengan memasukkan nilai suction dari data SWCC penelitian terdahulu. Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian, kemiringan, dan muka air tanah dapat dilihat pada Tabel 4.11. Pemodelan ini akan dianalisis dengan software geoteknik berupa Geostudio *(SEEP/W dan SLOPE/W)* dan *PLAXIS 2D*. Geometri lapisan tanah bawah tanggul dengan kedalaman 30 m yang terdapat 6 lapisan tanah.



Gambar 4. 6 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan

Gambar 4.6 menjelaskan mengenai hasil pemodelan tanggul dengan program SLOPE/W dari hasil pemodelan didapatkan nilai faktor keamanan paling rendah yaitu pada ketinggian tanggul 7 meter dan kemiringan 1:1 dengan variasi M.A.T 0 meter yaitu sebesar 1,774.



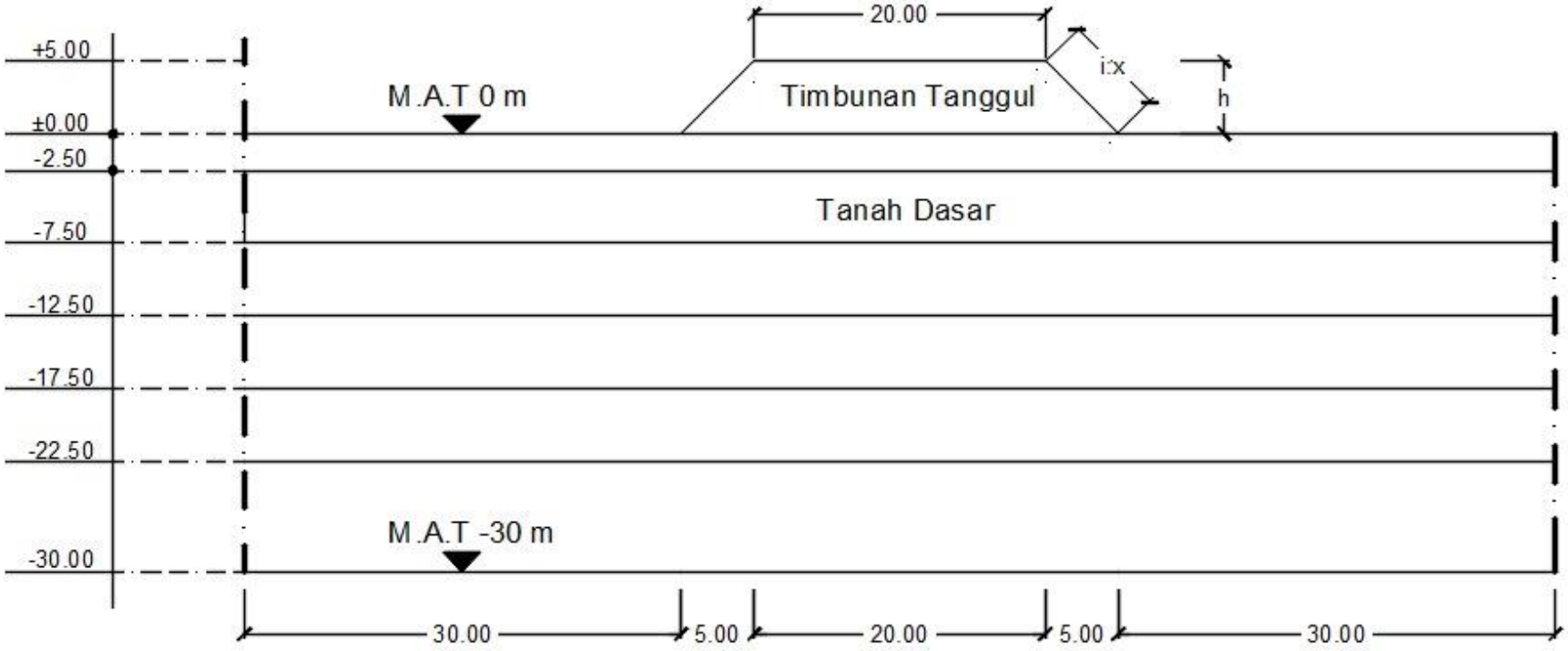
Gambar 4. 7 Hasil Pemodelan SLOPE/W Tinggi 7 meter dan Kemiringan 1:1

Pada Gambar 4.7 menjelaskan bahwa pengaruh nilai suction pada SWCC pemodelan tanggul mempengaruhi nilai angka keamanan pada tanggul. Hasil pemodelan tanggul pada muka air tanah (M.A.T) 0 m (Tabel 4.12) didapatkan kondisi semakin tinggi timbunan didapatkan rentang angka keamanan mulai 1,7

sampai 2,2 dan semakin besar kemiringan timbunan maka hasil rentang nilai angka keamanan yaitu FS $\geq$ 2,2 – 3,4.

2. Analisa Faktor Keamanan Tanggul Variasi Kemiringan dan Ketinggian Muka Air Tanah (M.A.T) -30 meter

Pada pemodelan dengan muka air tanah (M.A.T) -30 meter diilustrasikan seperti pada Gambar 4.8, sebagai berikut :



Gambar 4. 8 Pemodelan dengan Suction pada Campuran Optimum LuSi dan tanah lempung (M.A.T 0 m dan -30 m)

Tabel 4.12 menunjukkan nilai faktor keamanan tanggul pada kondisi muka air tanah -30 meter dengan beberapa variasi kemiringan dan ketinggian. Hasil perhitungan pemodelan dengan program bantu Geostudio disajikan pada tabel sebagai berikut:

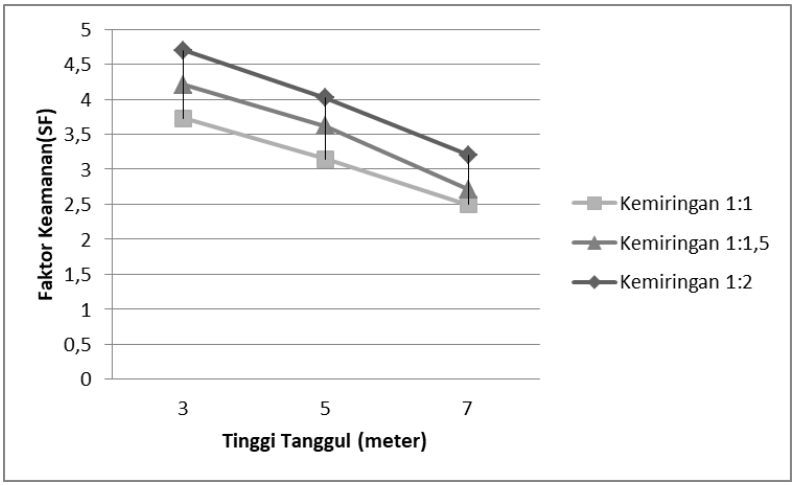
Tabel 4. 12 Hasil Pemodelan untuk Campuran LuSi dan Tanah Lempung M.A.T -30 Meter

NO	VARIASI		Hasil
	Ketinggian (meter)	Kemiringan	Faktor Keamanan (SF)
1	3	1:1	3,726
		1:1,5	4,207
		1:2	4,699
2	5	1:1	3,142
		1:1,5	3,615
		1:2	4,016
3	7	1:1	2,495
		1:1,5	2,71
		1:2	3,203

Sumber : Perhitungan

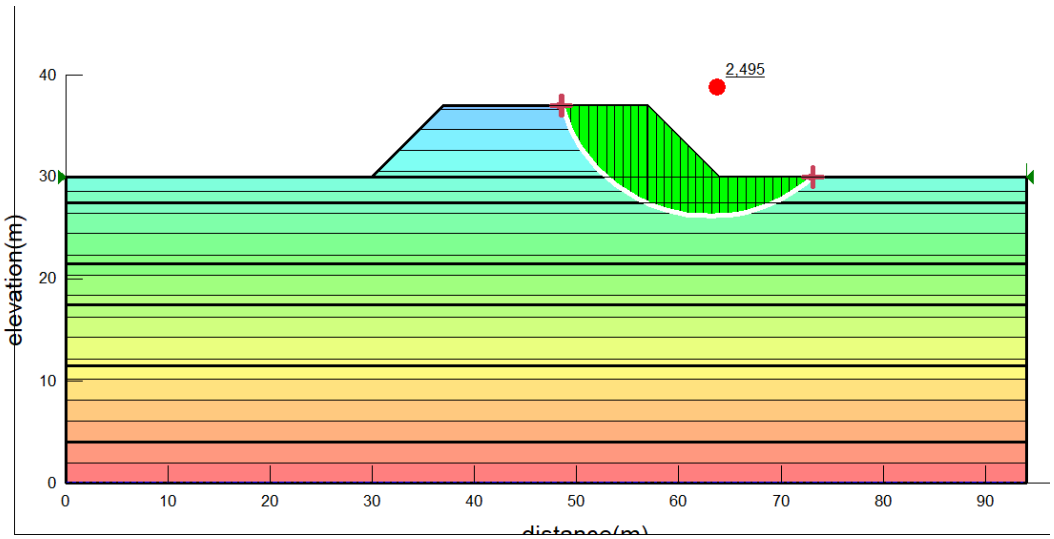
Dari hasil menjalankan program SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan paling kritis yaitu pada ketinggian tanggul 7 meter dan kemiringan 1:1 dengan variasi M.A.T -30 meter yaitu sebesar 2,496. Dari hasil menjalankan program SLOPE/W didapat nilai faktor keamanan paling kritis yaitu pada ketinggian tanggul 7 meter dan kemiringan 1:1 dengan variasi M.A.T -30 meter.

Pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan tinggi tanggul dengan faktor keamanan dengan menggunakan beberapa variasi kemiringan yaitu 1:1, 1:1,5 dan 1:2 serta variasi ketinggian tanggul yaitu variasi ketinggian tanggul 3 meter, 5 meter, dan 7 meter. Berdasarkan hasil dapat disimpulkan semakin tinggi tanggul maka semakin rendah angka keamanan, sedangkan pada kondisi ketinggian yang rendah didapatkan angka keamanan lebih besar.



Gambar 4. 9 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan

Hasil analisis stabilitas lereng tanggul pada kondisi muka air tanah -30 meter menggunakan program Slope/W dengan menggunakan metode *morgernstern-price*, nilai faktor keamanan yang tertinggi didapatkan adalah sebesar 2,495 pada geometri ketinggian tanggul 7 meter dan kemiringan 1:1.



Gambar 4. 10 Hasil Pemodelan SLOPE/W Tinggi 7 meter dan Kemiringan 1:1

Hasil pemodelan tanggul pada muka air tanah (M.A.T) - 30 m dengan variasi ketinggian yaitu 3 m, 5 m, dan 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2 didapatkan kondisi semakin tinggi timbunan maka angka keamanan didapatkan

rentang angka keamanan antara 2,4 - 3,2 dan semakin besar kemiringan timbunan maka rentang nilai angka keamanan yang didapatkan yaitu antara 2,7 - 4,6.

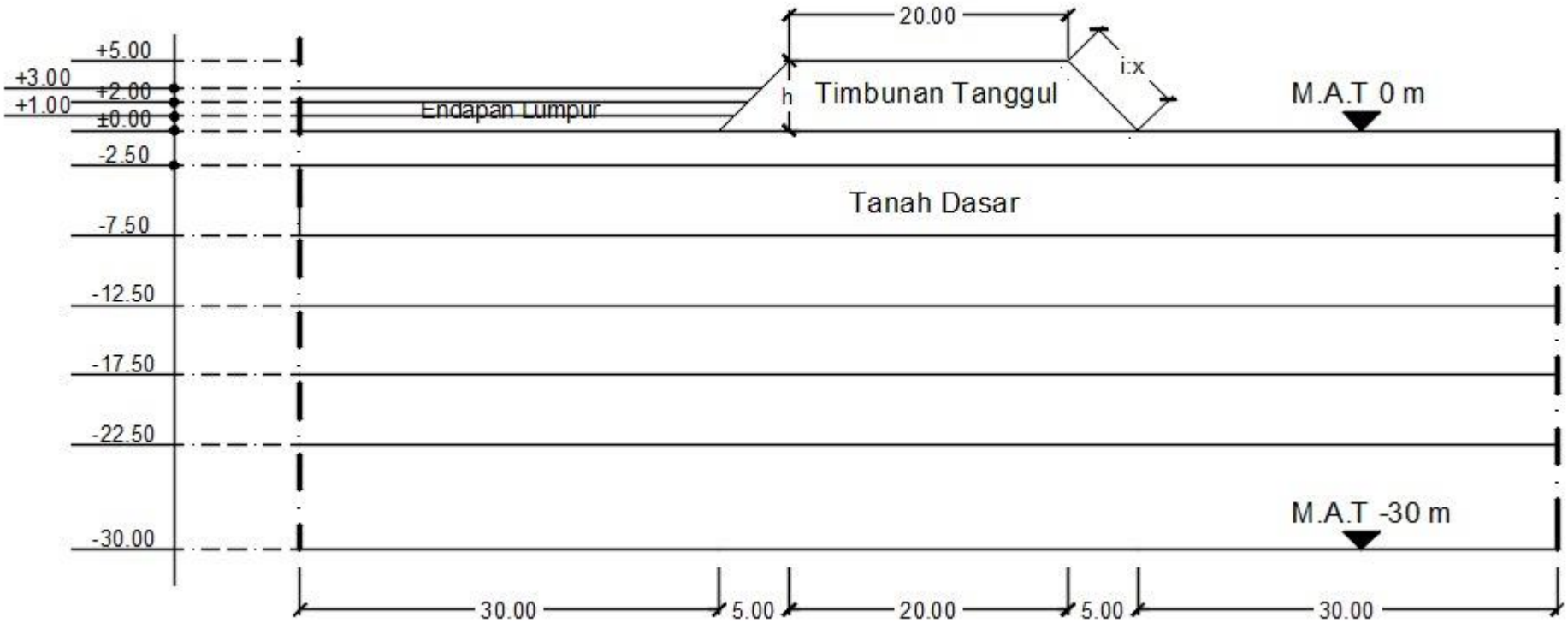
4.4.4. Pemodelan Variasi Endapan Lumpur (Campuran LuSi dan Tanah Lempung, Kertajaya Indah)

Pemodelan lainnya selain pemodelan muka air tanah pada timbunan adalah variasi pemodelan endapan lumpur untuk mendapatkan angka keamanan akibat pengaruh endapan lumpur. Pada pemodelan tersebut sebelah kiri tanggul dan sebelah kanan tetap terdapat aliran air.

Gambar 4.11 menunjukkan geometri tanggul dengan tinggi tanggul : 5 meter, lebar tanggul : 20 meter, dan kemiringan = 1:1 . Kedalaman tanah dasar adalah 30 meter sedangkan untuk parameter tanah dasar dan data timbunan terdapat pada sub bab 4.3. Analisa faktor keamanan tanggul akibat adanya endapan lumpur bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tinggi endapan lumpur terhadap nilai angka keamanan tanggul dengan menggunakan data campuran material LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah. Pemodelan variasi endapan lumpur dilakukan dengan menggunakan program Geostudio.

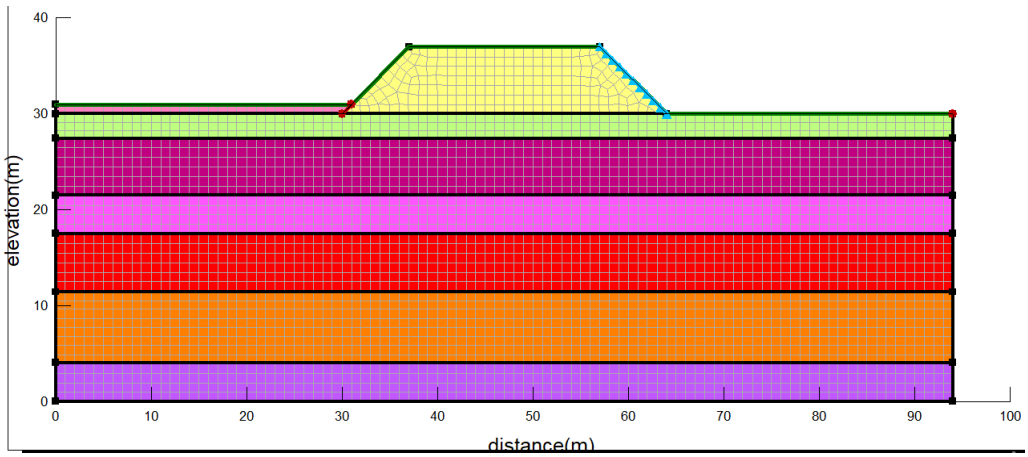
Geometri pemodelan endapan lumpur yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 untuk menganalisa stabilitas tanggul dengan kondisi muka air tanah yang sama dengan variasi endapan lumpur yang berbeda yaitu tinggi endapan lumpur 1 m, 2 m, dan 3 m. Kondisi tersebut juga dimodelkan dengan SEEP/W dan SLOPE/W.

Pemodelan tanggul ini dilakukan untuk mengetahui keamanan stabilitas lereng dengan memasukkan nilai suction. Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian dan kemiringan.



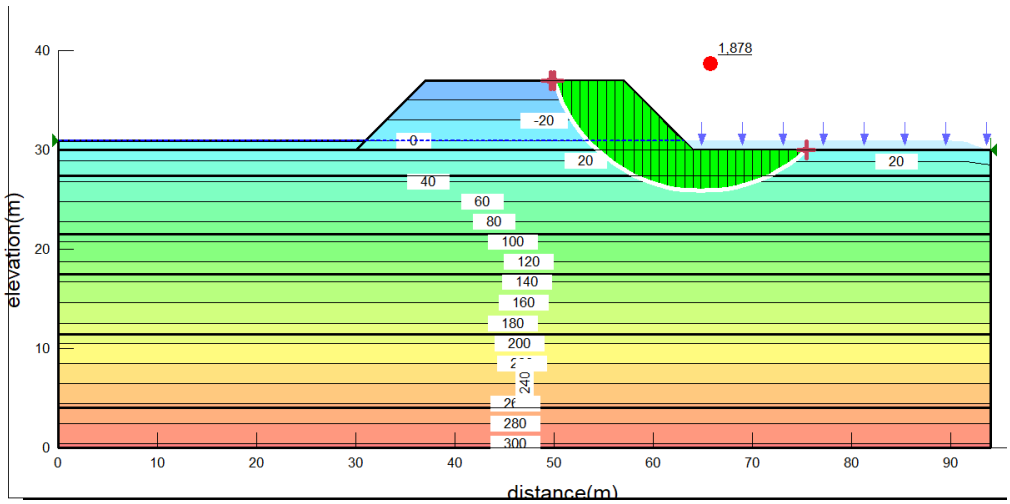
Gambar 4. 11 Variasi Endapan Lumpur 1 m dan Ketinggian Tanggul 5 Meter

Data tanah diambil dari data sekunder dan data untuk material endapan lumpur yaitu dari data LuSi kondisi inisial. Geometri yang dimodelkan dengan ketinggian 3 m, 5 m dan 7 m dan variasi endapan lumpur yaitu 1 m, 2 m, dan 3 m. Untuk pemodelan kemiringan tanggul untuk endapan lumpur diambil dari kemiringan nilai paling kritis dari pemodelan M.AT data campuran optimum LuSi dan tanah lempung yaitu pada kemiringan 1:1.



Gambar 4. 12 Variasi Endapan Lumpur 1 m dan Ketinggian Tanggul 5 Meter

Gambar 4.12 menunjukkan geometri pemodelan pada kondisi ketinggian tanggul 7 meter dengan kondisi endapan lumpur 1 meter dan kemiringan tanggul 1:1. Hasil pemodelan pada ketinggian tanggul 7 m menunjukkan nilai angka keamanan yaitu 1,878 (Gambar 4.13).



Gambar 4. 13 Geometri Pemodelan dengan Endapan Lumpur Ketinggian 7 meter

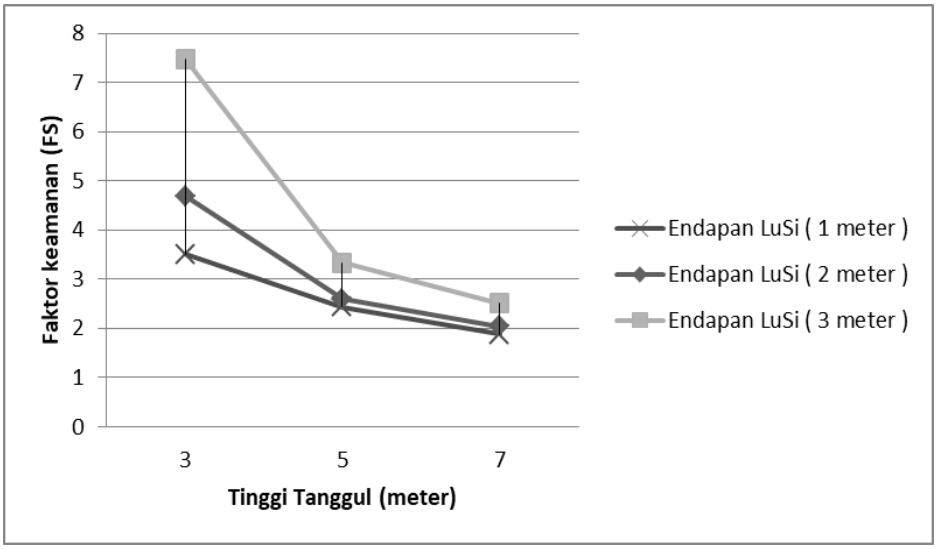
Tabel 4. 13 Analisa Faktor Keamanan Tanggul dengan Endapan Lumpur

NO	VARIASI		Hasil
	Ketinggian (meter)	Endapan LuSi (meter)	Faktor Keamanan (FS)
1	3	1	3,512
		2	4,69
		3	7,476
2	5	1	2,432
		2	2,591
		3	3,335
3	7	1	1,878
		2	2,041
		3	2,51

Sumber: Perhitungan

Pada pemodelan endapan lumpur semua variasi ketinggian tanggul menggunakan kemiringan 1:1. Tabel 4.13 menjelaskan tentang pemodelan tanggul dengan variasi ketinggian 3 m, 5 m, dan 7 m dengan tinggi endapan lumpur yaitu 1 m, 2 m, dan 3 m, dari hasil pemodelan SLOPE/W didapatkan kondisi faktor keamanan paling rendah yaitu 1,878 dengan ketinggian tanggul 7 meter.

Hasil perhitungan angka keamanan dengan Geostudio menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan paling rendah untuk pemodelan tanggul dengan endapan lumpur terjadi pada kondisi tinggi endapan lumpur 1 m, ketinggian tanggul 7 meter dan kemiringan tanggul 1:1. Kesimpulan dari pemodelan tersebut adalah semakin tinggi endapan lumpur semakin besar nilai angka keamanan dan sebaliknya semakin rendah endapan lumpur, maka semakin kecil angka keamanan.



Gambar 4. 14 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan

Hubungan ketinggian tanggul dengan faktor keamanan ditunjukkan pada Gambar 4.14 yang merepresentasikan nilai ketinggian tanggul dengan masing masing variasi 3 m, 5 m, dan 7 m dan nilai faktor keamanan yang didapatkan dari program GeoStudio. Sedangkan untuk variasi tinggi endapan yaitu 1 m, 2 m, dan 3 m. Hasil dari hubungan ketinggian tanggul dengan faktor keamanan menunjukkan bahwa semakin tinggi tanggul semakin besar nilai faktor keamanan. Pada ketinggian tanggul 7 m lebih curam daripada hasil yang lain dipengaruhi oleh faktor *slip surface* yang diinputkan dalam progam GeoStudio.

Hasil yang dapat disimpulkan untuk pengaruh endapan lumpur pada tanggul yaitu semakin tinggi endapan maka semakin besar nilai angka keamanan dipengaruhi oleh ketinggian tanggul. Nilai angka keamanan paling rendah yaitu 1,878.

Pada pemodelan untuk endapan LuSi didapatkan hasil berupa 3 kondisi yaitu kondisi pertama, pada ketinggian endapan LuSi 1 m dengan semakin tinggi timbunan maka rentang angka keamanan FS antara 1,8-3,5. Kondisi kedua, pada tinggi endapan LuSi 2 m dengan semakin tinggi timbunan maka rentang angka keamanan menghasilkan nilai antara 2,0- 4,7. Kondisi ketiga, pada endapan LuSi 3 m dapat dinyatakan bahwa semakin tinggi timbunan maka rentang angka keamanan FS antara 2,5-7,4.

4.4.5. Pengaruh Nilai Suction terhadap Faktor Keamanan Tanggul

Pada pembahasan nilai suction terhadap faktor keamanan tanggul bertujuan untuk mencari pengaruh nilai suction yang diwakilkan oleh perhitungan faktor keamanan menggunakan GeoStudio dan pehitungan tanpa nilai suction dengan perhitungan menggunakan PLAXIS.

Hasil faktor keamanan pada tanggul dengan 2 jenis software geoteknik yang berbeda, dapat dilihat terdapat perbedaan hasil diantara keduanya yaitu hasil angka keamanan dengan SLOPE/W menghasilkan angka keamanan yang lebih besar dibandingkan menggunakan PLAXIS 2D.

Hal tersebut terjadi pada tanggul dengan variasi kemiringan dan ketinggian tanggul. Hasil dari faktor keamanan PLAXIS 2D dengan SLOPE/W dapat dilihat pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Hasil Pemodelan untuk Campuran Optimum

NO	VARIASI		Faktor Keamanan	
	Ketinggian (meter)	Kemiringan	SLOPE/ W	PLAXIS
1	3	1:1	2,709	2,03
		1:1,5	2,999	2,334
		1:2	3,44	2,512
2	5	1:1	2,218	1,455
		1:1,5	2,51	1,833
		1:2	2,73	1,974
3	7	1:1	1,774	1,025
		1:1,5	1,93	1,082
		1:2	2,243	1,557

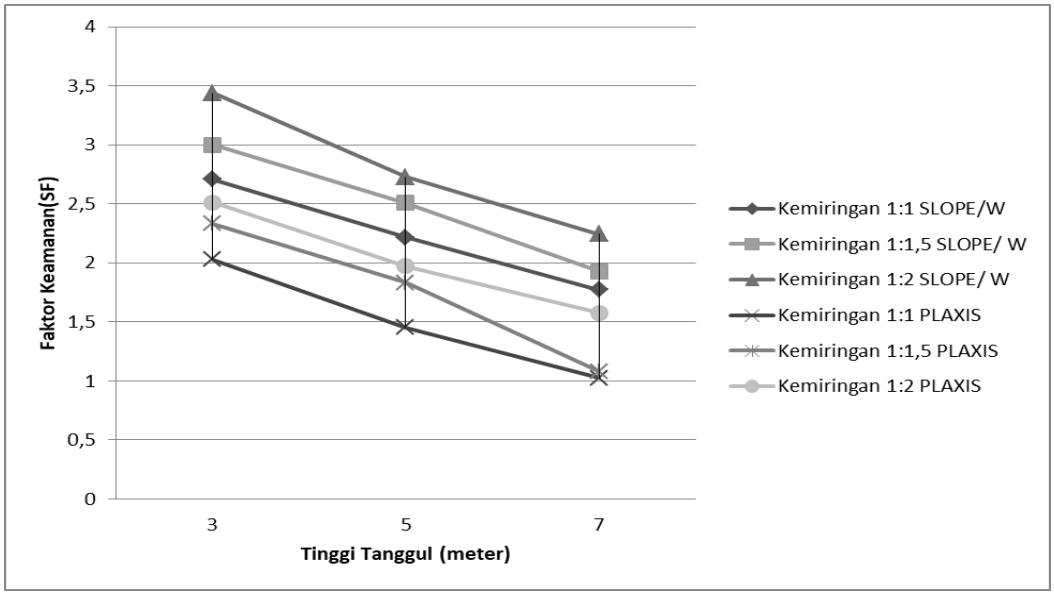
Sumber: Perhitungan

Tabel 4.14 menunjukkan hasil pemodelan menggunakan beberapa variasi ketinggian dan kemiringan. Pemodelan dengan program bantu Geostudio dan PLAXIS diwakili oleh pemodelan dengan muka air tanah yang sama yaitu muka air tanah (M.A.T) 0 m.

Pada hasil pemodelan menunjukkan bahwa adanya perbedaan hasil nilai faktor keamanan yang dipengaruhi oleh beberapa variasi pemodelan geometri

tanggul. Pemodelan dengan PLAXIS 2D tidak memasukkan nilai suction pada timbunan tanggul, sedangkan SLOPE/W memasukkan nilai suction pada parameter pemodelan tanggul.

Pada hasil pemodelan diketahui bahwa adanya pengaruh nilai suction terhadap peningkatan faktor keamanan tanggul. Pemodelan dengan ketinggian 7 meter menggunakan program Geostudio menghasilkan angka keamanan yang lebih aman yaitu rentang angka keamanan (1,7-2). Berbeda dengan tanpa menggunakan nilai suction dengan PLAXIS kondisi tidak aman yaitu rentang angka keamanan (1-1,5).



Gambar 4. 15 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Faktor Keamanan SLOPE/W dan PLAXIS 2D

Hubungan ketinggian tanggul dengan nilai keamanan (Gambar 4. 15) menunjukkan kesimpulan semakin tinggi tanggul maka penurunan angka keamanan semakin tinggi pula.

4.5. Penurunan tanah *Immediate Settlement* (Penurunan Seketika)

Hasil pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D dapat memberikan gambaran tentang penurunan tanah bersifat ***Immediate Settlement*** (penurunan

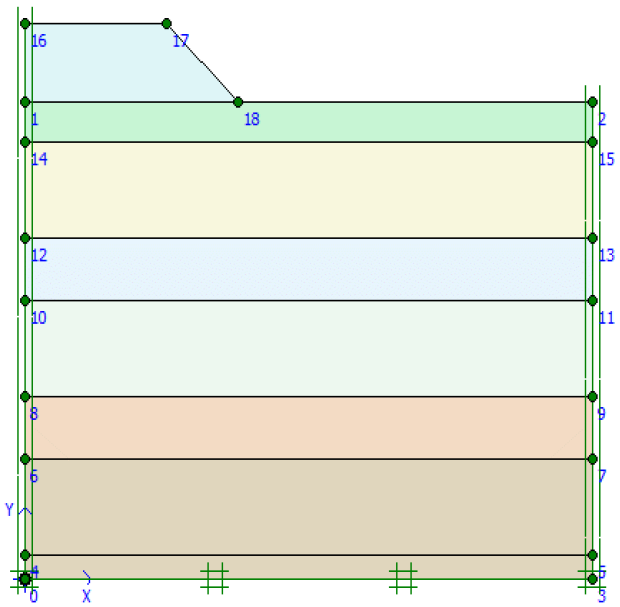
seketika), diakibatkan dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air, tanpa adanya perubahan kadar air.

Karena pemodelan yang dilakukan hanya sebagian dari kondisi lapangan, disamping itu adanya faktor – faktor lain yang ikut mempengaruhi kondisi sebenarnya. Pemodelan numerik yang sesuai dengan kondisi lapangan sulit dilakukan karena keterbatasan program. Akan tetapi pendekatan masih dapat dilakukan dengan cara memberi batasan-batasan dalam pemodelan sehingga proses perhitungan numerik masih mungkin untuk dilakukan.

Geometri simulasi ini pemodelan di dalam *PLAXIS 2D* dengan kedalaman tanah dasar yaitu 30 meter dan lebar tanggul 20 meter. Analisis stabilitas lereng dilakukan pada plaxis terdapat 2 (dua) kondisi yaitu pada kondisi tanpa aliran (*undrained*) dan pada kondisi ada aliran (*drained*).

Pada kondisi pemodelan PLAXIS menggunakan beberapa konfigurasi geometri tanggul. Pemodelan didasarkan pada parameter data sekunder campuran optimum yaitu nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (θ) yang diinputkan pada PLAXIS.

Pada kondisi model tanggul pada PLAXIS tanpa menggunakan pengaruh suction berbeda. Dalam pemodelan ini hanya menggunakan satu variasi muka air tanah yaitu pada M.AT 0 meter.



Gambar 4. 16 Pemodelan PLAXIS

4.5.1. Data Material untuk pemodelan *PLAXIS*

Parameter tanah dalam perhitungan analisis stabilitas sebagai masukan (input) pada analisis program *PLAXIS* didasarkan pada data sekunder yang didapatkan dari beberapa penelitian terdahulu.

Data tanah yang digunakan adalah data campuran optimum dari penelitian campuran optimum LuSi dan tanah lempung, berdasarkan hasil dari pemodelan digunakan untuk menghitung penurunan segera tanggul dengan program bantu PLAXIS 2D. Nilai k_x dan k_y didapatkan dari korelasi parameter sesuai jenis tanah pada lapisan tanah timbunan tersebut.

Tabel 4. 15 Data Parameter Tanah Timbunan

PARAMETER	SATUAN	NILAI
γ_{sat}	kN/ m^3	14,9
γ_{unsat}	kN/ m^3	18
k_x	m/day	1,00E-03
k_y	m/day	1,00E-03
E_{ref}	kN/ m^2	8000
v(nu)	-	0,3
G_{ref}	kN/ m^2	3076,923
E_{oed}	kN/ m^2	1,08E+04
c_{ref}	kN/ m^2	39,5
ϕ(phi)	°	5,76
φ(psi)	°	0
v_s	m/sec	46,21
v_p	m/sec	47,96

Sumber : Analisa Data Sekunder

Berdasarkan data Tabel 4.15 pemodelan PLAXIS dengan *Mohr Columb.* Data tanah yang digunakan adalah data penelitian terdahulu dengan campuran optimum LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah yang telah dibahas pada Bab 2.2. Data campuran tersebut yang akan dimodelkan dengan program bantu teknik sipil yaitu PLAXIS dengan beberapa data parameter yang ditunjukkan pada Tabel 4.15 dan beberapa nilai didapatkan dari korelasi parameter tanah didapatkan dari pembahasan Bab 3.

Tabel 4. 16 Data Parameter Tanah Dasar

Parameter	Satuan	Tanah 1	Tanah 2	Tanah 3	Tanah 4	Tanah 5	Tanah 6
Basic							
γ_d	kN/m³	15,1	17	14,2	13,4	14,2	18
Cohesion	kPa	8,825985	9,80665	6,864655	9,80665	9,80665	19,6133
∅ (Phi)	°	0	32	0	8	0	36
Material Model	-	Mohr-Coulomb					

Sumber : Analisa Data Sekunder

Pada Tabel 4.16 menjelaskan mengenai data tanah dasar yang digunakan untuk pemodelan data tanah dasar pada PLAXIS. Parameter masing-masing data tanah dimodelkan dengan *Mohr-Colulomb.*

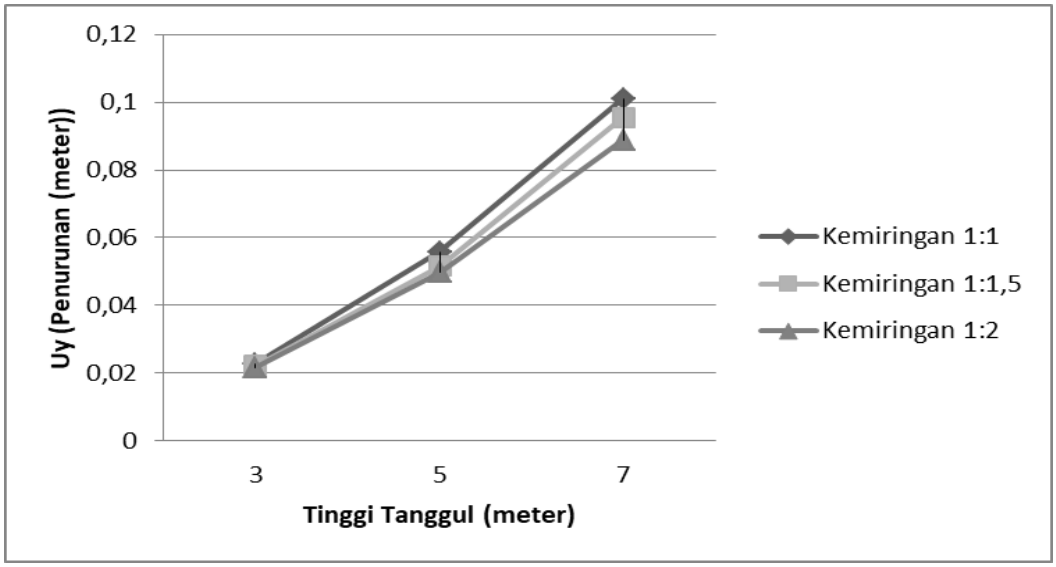
4.5.2. Analisa Pemampatan Segera (*Immediate settlement)* Tanggul

Pada pemodelan tanggul diperlukan perhitungan pemampatan segera tanggul dengan variasi geometri tanggul untuk ketinggian 3m, 5 m, dan 7 m serta kemirirngan 1:1, 1:1,5 dan 1:2. Pemodelan dengan PLAXIS menggunakan data campuran optimum LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah yang telah dibahas pada sub bab 4.5.1. Hasil dari pemodelan ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Hasil Pemodelan untuk Pemampatan Segera (*Immediate settlement)*

NO	VARIASI		Hasil
	Ketinggian (meter)	Kemiringan	Uy (meter)
1	3	1:1	0,02278
		1:1,5	0,02226
		1:2	0,02166
2	5	1:1	0,05581
		1:1,5	0,05155
		1:2	0,04972
3	7	1:1	0,10107
		1:1,5	0,09549
		1:2	0,08876

Sumber :Perhitungan



Gambar 4. 17 Hubungan antara Ketinggian Tanggul dengan Nilai Faktor Keamanan

Hasil yang didapatkan dari pemodelan pemampatan segera dengan *PLAXIS 2D* ditunjukkan pada Tabel 4.17 direpresentasikan melalui grafik hubungan antara ketinggian tanggul dengan nilai keamanan (Gambar 4.17) menunjukkan kesimpulan semakin tinggi tanggul maka penurunan segera semakin besar pula.

Hasil simulasi pemodelan dengan *PLAXIS* untuk pemampatan segera (*Immediate Settlement)*, dari pemodelan tersebut didapatkan hasil bahwa timbunan yang menggunakan material campuran LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah menunjukkan nilai pemampatan yaitu rentang antara 2 cm - 10 cm per 200 hari. Pemampatan segera (*Immediate Settlement)* yang terjadi pada kemiringan 1:1 didapatkan hasil pemampatan segera jauh lebih besar dibandingkan dengan pemampatan kemiringan 1:2. Semakin tinggi timbunan maka rentang peampatan antara 0,08876 m sampai 0,10107 m dan semakin besar kemiringan pada tanggul maka rentang penurunan mulai 0,08876 m sampai 0,02166 m.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan pada Bab 5 dapat disimpulan beberapa antara lain :

1. Berdasarkan hasil validasi nilai suction maka dapat disimpulkan bahwa nilai suction dari hasil pemodelan telah memenuhi persyaratan sesuai kurva grafik SWCC. Proses validasi ini diperlukan untuk sebagai persyaratan sebelum dilakukannya analisa kestabilan tanggul.
2. Hasil Pemodelan tanggul untuk material tanggul yang terbuat dari material LuSi pada tanah lempung dengan muka air tanah (M.A.T) 0 m dengan variasi ketinggian yaitu 3 m, 5 m, dan 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2 menunjukkan bahwa pada kondisi semakin tinggi timbunan maka rentang angka keamanan mulai 1,7 sampai 2,2 dan semakin besar kemiringan timbunan maka hasil rentang nilai angka keamanan yaitu FS $\geq$ 2,2 – 3,4. Sedangkan, hasil pemodelan tanggul lainnya untuk muka air tanah (M.A.T) - 30 m dengan variasi ketinggian yaitu 3 m, 5 m, dan 7 m dan kemiringan 1:1, 1:1,5 dan 1:2 didapatkan kondisi semakin tinggi timbunan, maka didapatkan rentang angka keamanan antara 2,4 - 3,2 dan semakin besar kemiringan timbunan maka rentang nilai angka keamanan yang didapatkan yaitu antara 2,7 - 4,6.
3. Hasil simulasi pemodelan dengan *PLAXIS* untuk pemampatan segera (*Immediate Settlement)* , dari pemodelan tersebut didapatkan hasil bahwa timbunan yang menggunakan material campuran LuSi dan tanah lempung Kertajaya Indah menunjukkan nilai pemampatan yaitu rentang antara 2 cm - 10 cm per 200 hari. Pemampatan segera (*Immediate Settlement)* yang terjadi pada kemiringan 1:1 didapatkan hasil pemampatan segera jauh lebih besar dibandingkan dengan pemampatan kemiringan 1:2. Semakin tinggi timbunan maka rentang peampatan antara 0,08876 m sampai 0,10107 m dan

semakin besar kemiringan pada tanggul maka rentang penurunan mulai 0,08876 m sampai 0,02166 m.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dari analisis stabilitas lereng, saran yang diajukan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukannya perhitungan dengan muka air tanah yang berbeda untuk pemodelan endapan Lumpur Sidoarjo.
2. Dari hasil analisis stabilitas lereng, perlu dilakukan penelitian pembasahan dan pengeringan di laboraturium untuk beberapa prosentase campuran material Lumpur Sidoarjo dan tanah lempung.

DAFTAR PUSTAKA

BPLS PUPR, 2018 .Monitoring Tanggul Uji dengan Material Lumpur Sidoarjo dan Borrow Area: Surakarta

Charles W.W.Ng and Bruce Menzies. 2007. *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN, USA and Canada.

Chasanah, Uswatun. 2012, Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Geotekstil Menggunakan Program Geoslope, Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret : Surakarta.

Devina dkk, 2018. Kajian Kekuatan Tanah dan Kestabilan Tubuh Tanggul pada Rencana Tanggul Wedok Lumpur Sidoarjo, Jurnal Geosains dan Teknologi Undip: Semarang.

Faizah, I., 2013, Peningkatan Perilaku Lumpur Sidoarjo (LuSi) dengan bahan additive CaCO3 dan Ca(OH)2 Untuk Material Timbunan, ITS :Surabaya

Fredlund, 2000. "The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering, - R.M. Hardy Address". NRC Research Press website. Universityof Saskatchewan. Saskatoon. Canada.

Fredlund & Rahardjo, 1993, "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". A Willey interscience publication. John Wiley & Sons, Inc. 1-19.

Fredlund, D.G, Rahardjo, H. &, Fredlund, M.D. 2012, "Unsaturated Soil Mechanicsin Engineering Practice". A Willey-interscience publication. John Wiley & Sons, Inc. ,520 - 578.

Fredlund DG, Raharjo H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils. A wiley-Interscience Publication*. John Wiley & Sons, INC.

Maliki A. 2015, Aplikasi Mekanisme Coalescence Pada Model Matematis Dan Simulasi Granulasi Lumpur Sidoarjo(Lusi) Menjadi Butiran Bergradasi Baik(Well Graded), Jurnal ITS : Surabaya

M.Yusof dkk. 2016. *The Soil-Water Characteristic Curve of Unsaturated*

Tropical Residual Soil IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 136 : Malaysia

Prakoso, Agus, dkk. 2019 Analisis Penurunan Timbunan Tanah Silt Pada Proyek Jalan Ruas Giriwoyo-Duwet Wonogiri Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri : Semarang

Senawati, dkk. 2018 .Penyelidikan Kedalaman Bidang Gelincir Menggunakan Metode Geolistrik Hambatan Jenis Pada Ruas Jalan Tavaili - Toboli, Kabupaten Donggala Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Tadulako :Palu

Schofield, R.K. 1935 "*The pF of Water in Soil*" Trans, 3rd Int. Congr. Soil Sci. Oxford.

Sri U, Gati. 2015, Daya Dukung Tanah Lempung Pada Ruas Jalan Kertajaya Indah Timur Surabaya Dengan Lumpur Lapindo, Seminar Nasional ITATS: Surabaya

Soemitro et al., 2014, Pengaruh Siklus Pengeringan dan Pembasahan Terhadap Sifat Fisik, Mekanik dan Dinamik pada Tanah Tanggul Sungai Bengawan Solo Cross Section 0±500 Desa Semambung Bojonegoro yang Distabilisasi dengan Kapur, Fly Ash, dan Mikro Biobakteri, Jurnal Teknik POMITS : Surabaya

Wardana.IG.N, 2011. Pengaruh Perubahan Muka Air Tanah Dan Terasering Terhadap Perubahan Kestabilan Lereng, Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Vol. 15, No. 1, Januari 2011 Universitas Udayana: Denpasar

Utami, Sri dkk. 2014 Identifikasi Potensi Longsor Menggunakan Metode Seismik Refraksi Di Kawasan Wisata Nglimut Desa Gonoharjo Limbangan Kendal Universitas Negeri Semarang :Semarang

Yudayana. 2001, Pengaruh Variasi Tegangan Air Pori Negatif terhadap Perubahan Tegangan Geser pada *Lempung Kaolinite :* Surabaya

LAMPIRAN 1

I. Pemodelan dengan *GeoStudio*

1. Pengaturan Awal

Pengaturan awal untuk melakukan analisis dengan program Geoslope terdiri dari beberapa tahap, diantaranya pengaturan kertas kerja, skala gambar dan jarak grid.

c. Mengatur kertas kerja, dari menu utama *set klik page*

d. Mengatur skala gambar

e. Mengatur jarak grid

2. Membuat Sketsa gambar

Pemodlean tanggul dimulai dengan pembuatan sketsa gambar dari model, yang merupakan representasi dari masalah yang akan dianalisa.

3. Analysis Settings

Analysis Settings merupakan tahapan untuk menentukan pengaturan dalam menganalisis stabilitas kelongsoran tanggul

II. Pemodelan dengan *PLAXIS*

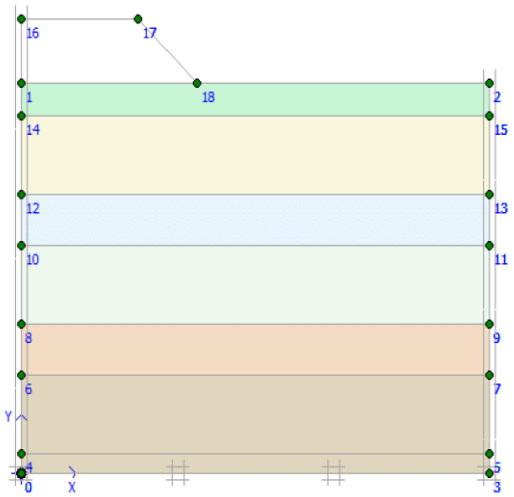
Analisis Permodelan pada *PLAXIS*. Dimana *PLAXIS* menyajikan beberapa permodelan untuk mensimulasikan beberapa tingkah laku dari tanah. Permodelan-permodelan tersebut adalah permodelan linear *Elastic*, permodelan *Mohr-Coulomb*, permodelan *jointed rock*, permodelan *hardening soil*, permodelan *soft soil*, permodelan *soft soil creep*, permodelan *user defined soil*. Permodelan ini meliputi lima parameter yaitu *Young's modulus (E), Poisson's ratio(ν)* , kohesi(c), sudut geser(Ø), dan sudut dilatansi (ψ).

Pada pemodelan dengan *PLAXIS* digunakan pemodelan setengah tanggul. Beberapa tahapan untuk pemodelan *PLAXIS*.

1. Geometry Model :

a. Pilih type analysis (Model) : Plain Strain dan Elements : 15-Node

b. Gambarlah geometri Road Embankment sesuai gambar berikut ini



Gambar 3. 6 Geometri Pemodelan Plaxis

2. Material Sets and Mesh Generation :

a. Input data Material Sets sesuai yang dibutuhkan dengan cara Drag data tanah pada area gambar, kemudian klik OK.

b. Pilih Mesh dan klik Global Coarseness – medium

c. Klik Generate mesh, kemudian Update.

3. Initial Conditions :

a. Klik Initial Conditions, kemudian muncul nilai □water sebesar 10,000 kN/m3, klik OK.

b. Klik ”Initial Pore Pressures”

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

c. Klik Generate water pressure, pilih Phreatic level, dan Update

d. Klik ”Initial Pore Pressures”

e. Klik“Generate Initial Stresses”, kemudian muncul nilai ∑M-weight = 1,000. Klik OK. Setelah diberi Generate Initial Stresses akan muncul gambar seperti dibawah ini, kemudian klik Update.

4. Calculations :

Initial Phase

a. Phase 1 “1. Timbunan 2m – 5day”

Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 5 day, klik Define Klik timbunan 1, dan Update- Next

b. Phase 2 “2. Consolidation 200day”

Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 200 day Next

c. Phase 3 “3. Timbunan 2m – 5day”

Pilih Consolidation, kemudian time interval beri 5 day, klik Define Klik timbunan 2, dan Update- Next

d. Phase 4 “4. Consolidation till p=1”

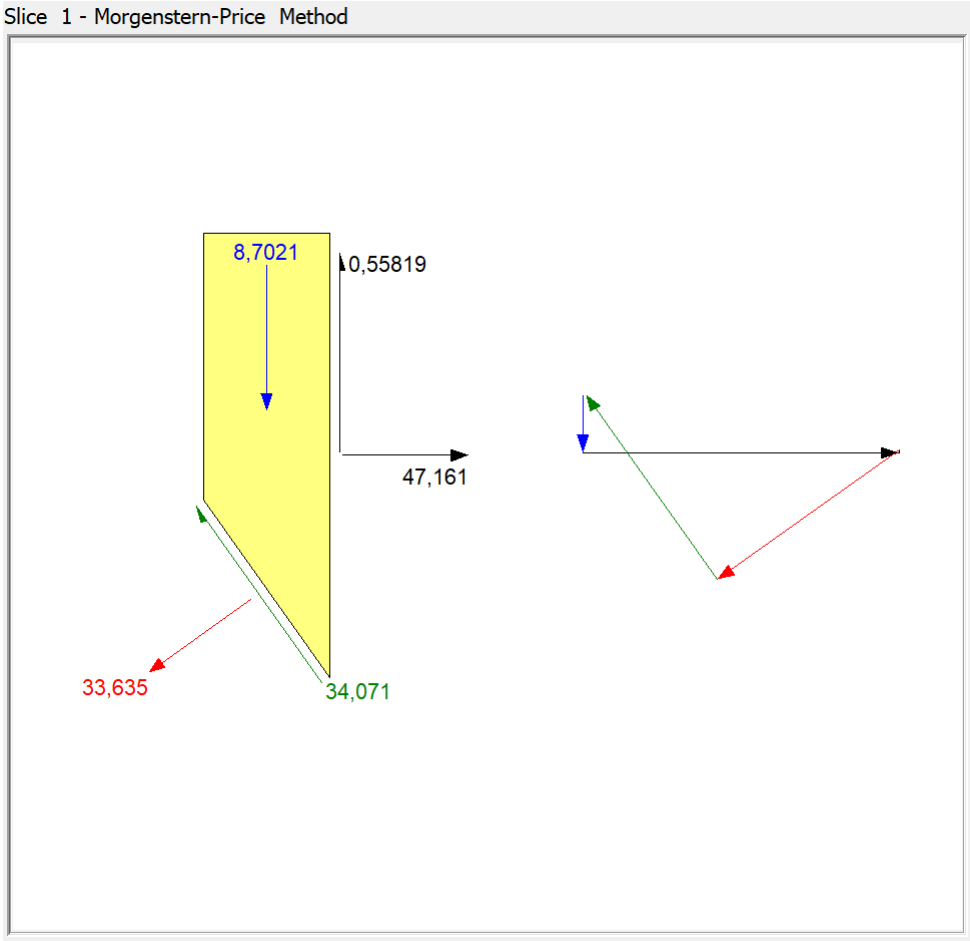
Pilih Consolidation, kemudian Minimum Pore Pressure = 1,000 kN/m2.

e. Pilih point A dan B pada Road Embankment.

5. Calculate

6. Ouput

LAMPIRAN 2



Slice 1 - Morgenstern-Price Method
Factor of Safety 1,528
Phi Angle 17 °
C (Strength) 19,61 kPa
Pore Water Pressure -62,211 kPa
Pore Water Force -100,41 kN
Pore Air Pressure 0 kPa
Pore Air Force 0 kN
Phi B Angle 17 °
Slice Width 0,93885 m
Mid-Height 0,65644 m
Base Length 1,614 m
Base Angle -54,431 °
Anisotropic Strength Mod. 1
Applied Lambda -0,11667
Weight (incl. Vert. Seismic) 8,7021 kN
Base Normal Force -33,635 kN
Base Normal Stress -20,839 kPa
Base Shear Res. Force 52,066 kN

Base Shear Res. Stress 32,259 kPa

Base Shear Mob. Force 34,071 kN
Base Shear Mob. Stress 21,109 kPa
Left Side Normal Force --- kN
Left Side Shear Force --- kN
Right Side Normal Force-47,161 kN
Right Side Shear Force 0,55819 kN
Horizontal Seismic Force 0 kN
Point Load 0 kN
Reinforcement Load Used 0 kN
Reinf. Shear Load Used 0 kN
Surcharge Load 0 kN
Polygon Closure0,52727 kN
Top Left Coordinate 48; 37 m
Top Right Coordinate 48,938849; 37 m
Bottom Left Coordinate 48; 37 m
Bottom Right Coordinate 48,938849; 35,687127 m

Parameter
MethodMorgenstern-Price
Factor of Safety 1,528
Total Volume 106,31 m³
Total Weight 1.544,3 kN
Total Resisting Moment 14.746 kN-m
Total Activating Moment 9.648,9 kN-m
Total Resisting Force 559,24 kN
Total Activating Force 365,97 kN

File Information
File Version: 8.15
Title: Variasi tinggi = 7 m
Revision Number: 51
Date: 23/06/2020
Time: 08:53:16
Tool Version: 8.15.1.11236
File Name: tesis variasi tinggi = 7 m 1-1 pl tg lumpur.gsz
Directory: C:\Users\Indra Rahma Hardiana\Documents\PL TINGGI\
Last Solved Date: 23/06/2020
Last Solved Time: 08:53:18
Project Settings
Length(L) Units: Meters
Time(t) Units: Seconds
Force(F) Units: Kilonewtons
Pressure(p) Units: kPa
Strength Units: kPa
Unit Weight of Water: 9,807 kN/m³
View: 2D

Element Thickness: 1
Analysis Settings
Slope Stability
Kind: SLOPE/W
Parent: Steady-State Seepage
Method: Morgenstern-Price
Settings
Side Function
Interslice force function option: Half-Sine
PWP Conditions Source: Parent Analysis
Slip Surface
Direction of movement: Left to Right
Use Passive Mode: No
Slip Surface Option: Entry and Exit
Critical slip surfaces saved: 1
Resisting Side Maximum Convex Angle: 1 °
Driving Side Maximum Convex Angle: 5 °
Optimize Critical Slip Surface Location: No
Tension Crack
Tension Crack Option: (none)
F of S Distribution
F of S Calculation Option: Constant
Advanced
Number of Slices: 30
F of S Tolerance: 0,001
Minimum Slip Surface Depth: 0,1 m
Search Method: Root Finder
Tolerable difference between starting and converged F of S: 3
Maximum iterations to calculate converged lambda: 20
Max Absolute Lambda: 2
Materials
Timbunan
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 14,12 kN/m³
Cohesion': 19,61 kPa
Phi': 17 °
Vol. WC. Function: SWCC
Residual Water Content (% of Sat WC): 15 %

soil 1
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 15,1 kN/m³
Cohesion': 8,86 kPa
Phi': 0 °
Phi-B: 0 °
Soil 2
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 17 kN/m³

Cohesion': 9,8 kPa
Phi': 32 °
Phi-B: 0 °
soil (3)
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 14,2 kN/m³
Cohesion': 6,86 kPa
Phi': 0 °
Phi-B: 0 °
soil (4)
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 13,4 kN/m³
Cohesion': 9,8 kPa
Phi': 8 °
Phi-B: 0 °
soil (5)
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 14,2 kN/m³
Cohesion': 9,8 kPa
Phi': 0 °
Phi-B: 0 °
soil (6)
Model: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 18 kN/m³
Cohesion': 19,6 kPa
Phi': 36 °
Phi-B: 0 °

Slip Surface Entry and Exit
Left Projection: Range
Left-Zone Left Coordinate: (47,9569; 37) m
Left-Zone Right Coordinate: (48; 37) m
Left-Zone Increment: 4
Right Projection: Point
Right Coordinate: (77,02472; 30) m
Right-Zone Increment: 4
Radius Increments: 4

Slip Surface Limits
Left Coordinate: (0; 30) m
Right Coordinate: (94; 30) m

Vol. Water Content Functions

SWCC
Model: Vol WC Data Point Function
Function: Vol. Water Content vs. Pore-Water Pressure

Mv: 0 /kPa
Saturated Water Content: 0,56268208 m^3/m^3
Residual Water Content: 0,056268208 m^3/m^3
Curve Fit to Data: 100 %
Segment Curvature: 100 %
Porosity: 0,56268208
Data Points: Matric Suction (kPa), Vol. Water Content (m^3/m^3)
Data Point: (560,53; 0,15136)
Data Point: (2.091,7; 0,159274)
Data Point: (5.307,62; 0,35002)
Data Point: (49.911,4; 0,381244)
Data Point: (170.141; 0,6183)
Estimation Properties
Vol. WC Estimation Method: Sample functions
Saturated Water Content: 0,5 m^3/m^3
Sample Material: Clay
Liquid Limit: 0 %
Diameter at 10% passing: 0
Diameter at 60% passing: 0
Maximum: 800
Minimum: 0,01
Num. Points: 20

LAMPIRAN 3

DATA DB-01

BIODATA PENULIS

Indra Rahma Hardiana. Lahir di Batu, 23 Agustus 1996, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK DHARMAWANITA 01 BATU, SDN NGAGLIK 01 BATU, SMP NEGERI 1 BATU, SMA NEGERI 1 BATU. Setelah lulus dari jenjang pendidikan SMA. Pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan di program S-1 Teknik Sipil ITN Malang. Setelah lulus jenjang sarjana, pada tahun 2018 penulis melanjutkan studi pasca sarjana dalam bidang keahlian Geoteknik di Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumian- ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email yaitu indrarahmahardiana@yahoo.co.id