

Penerapan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) pada Pemodelan Tanggul Menggunakan Material Lumpur Sidoarjo yang Distabilisasi dengan Kapur

Dyah Ayu Rahmawati Cupasindy^{1,*}, Ria Asih Aryani Soemitro¹, Indarto¹, Trihanyndio Rendy Satrya¹

Departemen Teknik Sipil, Insitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: dyahayurc7@gmail.com

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	12 Agustus 2020	<p><i>This research is a modeling geotechnical auxiliary programs with secondary data processing from previous research. The purpose of this modeling is to analyze the stability of the embankment due to the application of the matric suction value on the Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) to see the effect of changes in water content in the lime stabilized LuSi material which can be used as embankment embankment material. The matric suction value used with a value of 1-480 kPa greatly affects the stability of the embankment and the relation to the value of the safety value. The effect of groundwater level elevation gives the value of the safety factor of the embankment in a safe condition with a range of 1.3-2.6 at the variation in height (6-10 m) and embankment slope (1: 1, 1: 1.5 and 1: 2). The effect of the height of the LuSi sediment provides a value of the safety factor of the embankment in a safe condition with a range of 1.25 - 2.12 on a 1: 2 slope at height (1-7 m). The rate of immediate settlement on the embankment ranges from 14 - 40 cm every 200 days for variations in height (6-10 m) and embankment slope (1: 1, 1: 1.5 and 1: 2).</i></p> <p>Abstrak Penelitian ini bersifat pemodelan program bantu geoteknik dengan pengolahan data sekunder dari penelitian terdahulu. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk menganalisis stabilitas tanggul akibat penerapan nilai <i>matric suction</i> pada <i>Soil-Water Characteristic Curve</i> (SWCC) untuk melihat pengaruh perubahan kadar air pada material LuSi distabilisasi kapur yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan timbunan tanggul. Nilai <i>matric suction</i> yang digunakan dengan nilai 1-480 kPa sangatlah berpengaruh pada stabilitas tanggul dan relasi nilai angka keamanan. Pengaruh elevasi muka air tanah memberikan nilai faktor keamanan tanggul dalam kondisi aman dengan rentang 1,3 – 2,6 pada variasi tinggi (6-10 m) dan kemiringan tanggul (1:1, 1:1.5 dan 1:2). Pengaruh tinggi endapan LuSi memberikan nilai faktor keamanan tanggul dalam kondisi aman dengan rentang 1,25 – 2,12 pada kemiringan 1:2 pada tinggi (1-7 m). Besar penurunan segera pada tanggul berkisar 14 - 40 cm setiap 200 hari untuk variasi tinggi (6-10 m) dan kemiringan tanggul (1:1, 1:1.5 dan 1:2).</p>
Diperbaiki	19 Agustus 2020	
Disetujui	19 Agustus 2020	

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

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

1. Pendahuluan

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

selanjutnya lumpur dibuang ke laut secara alami mengikuti (terbawa) aliran sungai[1]. Peningkatan kapasitas lumpur yang menumpuk, membuat potensi lumpur sidoarjo dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar urugan yang mempunyai nilai ekonomis yang tinggi.

Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kementrian (PUPR) telah melakukan penelitian pemanfaatan LuSi[1], sebagai bahan campuran *quarry* untuk material tanggul uji coba (Demplot). Kondisi tanggul uji coba mengalami retakan (*crack*) pada kedua sisi tanggul dengan kedalaman ±50cm dan panjang retakan ±1.3m terdapat bagian erosi pada sisi tanggul dengan panjang ±2.7m. Kejadian keretakan dan erosi tanggul uji coba dicurigai adanya faktor perubahan iklim. Indonesia merupakan negara yang memiliki iklim tropis, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Hal tersebut yang mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanik dari tanah itu sendiri karena terjadi perubahan volume tanah yang disebabkan oleh kadar air sehingga

membuat kekuatan tanah menurun, dan berpeluang terjadinya penurunan kuat geser (*shear strength*) tanah, khususnya tanah dasar menjadi meningkat. Perubahan kadar air yang dipengaruhi oleh faktor iklim dapat dilihat dari data *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) merupakan hubungan antara potensial air tanah dan *gravimetric water content, volumetric water content or degree of saturation*. SWCC merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk pemodelan aliran air tanah [2]. *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) merupakan kurva yang menggambarkan hubungan jumlah air dalam tanah yang mempengaruhi perubahan *suction* tanah [2].

Hal ini dapat ditanggulangi dengan melakukan stabilisasi secara kimia. Material kimia yang digunakan kapur sebagai bahan untuk memperbaiki karakteristik tanah dan kekuatan tanah tanggul. Oleh sebab itu, diperlukan stabilisasi untuk memperbaiki sifat yang jelek pada LuSi. Stabilisasi yang akan dilakukan berupa stabilisasi kimia, dengan mencampurkan bahan stabilisasi berupa kapur ke dalam LuSi.

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

2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan secara analisa data sekunder dengan didukung data penelitian terdahulu dengan beberapa tahap kegiatan. Penentuan material bahan timbunan urugan tanggul dan prosentase campuran yang optimum dilakukan berbagai variasi campuran dengan prosentase bahan campuran yang berbeda-beda pula dari pengolahan data sekunder yang didukung data penelitian terdahulu, serta melihat stabilitas tanggul dari kelongsoran yang telah mengalami perubahan iklim. Urutan pekerjaan secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut:

- Proses tahapan awal penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data-data yang diperlukan. Data-data tersebut berupa data penunjang yaitu studi literatur dan studi penelitian sebelumnya serta data sekunder yang didukung penelitian lainnya.
- Tahap Analisa untuk perencanaan campuran LuSi yang distabilisasi dengan kapur untuk mencari nilai optimum terbagi menjadi 2 yaitu:
 - a. LuSi dengan kapur hidup jenis CaO
Data Sekunder yang akan digunakan sebagai analisa dari peneliti Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo [1], dengan variasi prosentase 2% - 12%.
 - b. LuSi dengan kapur mati jenis Ca(OH)₂
Data Sekunder yang akan digunakan sebagai analisa dari Tesis Iis Faizah, dengan variasi prosentase 5% - 15% [3].
Pada tahap analisa tersebut dimaksudkan untuk mengetahui perbedaan dari jenis kapur serta karakteristik dari tanah tersebut yang sudah dilakukan stabilisasi dengan kimia.
- Persyaratan timbunan biasa dilakukan sebagai penunjang keamanan tanggul yang akan diterapkan dan dimodelkan sesuai dengan yang disyaratkan menurut Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Modul-4 Spesifikasi Pekerjaan Tanah 2016[4].
- Pendekatan data *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) dilakukan untuk mengetahui hasil pengeringan dan pembasahan akibat perubahan iklim. Dengan mengacu pada komposisi optimum dari lumpur yang ditambahkan dengan bahan stabilisator yaitu kapur. Dalam pemetaan tersebut dilakukan dengan melihat nilai dari segi parameter fisik dan mekanik. Parameter fisik dan mekanik yang dapat dilihat sebagai berikut:
 - *Specific Gravity*
 - *Kadar Air (Water Content)*
 - *Atterberg Limit*
 - *Analisa Saringan dan Hidrometer*
 - *Klasifikasi Tanah*
 - *Proctor Standar*
 - *Triaksial*
- Dari segi parameter fisik dan mekanik, juga dilihat untuk grafik SWCC yang dimana grafik SWCC digunakan untuk input data ke analisa pemodelan dengan software geoteknik yaitu memasukkan nilai *Suction* dan *Volumetric Water Content*.
- Tahap pemodelan tanggul ini data yang dibutuhkan adalah hasil dari campuran optimum LuSi yang distabilisasi dengan kapur untuk bahan timbunan tanggul yang terbagi menjadi 2 kondisi, kemudian data tanah

dasar bawah tanggul diperoleh dari Pusat Pengendalian Lumpur Sidoarjo yaitu Data BorLog DB-01.

- Analisis hasil ini dilakukan dengan cara melakukan pemetaan data dari peneliti terdahulu serta data sekunder sebagai dasar atau gambaran dari pemodelan tanggul yang aman melalui proses pengeringan dan pembasahan (perubahan iklim) yang bahan timbunannya menggunakan lumpur yang distabilisasi dengan kapur.
 - a. Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum
 - b. Penentuan Data Matric Suction berdasarkan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
 - c. Validasi Parameter *Matric Suction* Hasil Pemodelan SEEP/W terhadap Model SWCC
 - d. Stabilitas Tanggul dan Penurunan
 - Program *GeoStudio* (SEEP/W dan SLOPE/W)
Analisa model untuk stabilitas tanggul terkait 4 variasi pemodelan dengan mengacu pada ketinggian, kemiringan tanggul, elevasi muka air tanah dan endapan LuSi. Hasil yang diperoleh dari program *GeoStudio* adalah nilai faktor keamanan (SF) pada setiap kondisi yang menunjukkan kestabilan lereng tanggul dengan adanya penerapan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC).
 - Program *PLAXIS 2D*
Analisa penurunan segera (*Immediate Settlement*) pada tanggul dengan variasi geometri (ketinggian dan kemiringan tanggul).

3. Hasil dan Pembahasan

a. Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum

Tabel 1 menunjukkan bahwa prosentase optimum dengan bahan stabilisasi kapur terbagi menjadi 2 (dua) macam yaitu adalah 4% CaO dari penelitian Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kemertian PUPR [1] dan 10% Ca(OH)₂ dengan umur stabilisasi 20 hari [3]. Hal ini dibedakan dari klasifikasi tanah bahwa LuSi yang distabilisasi dengan CaO merupakan plastisitas tinggi karena masuk kedalam kelompok A-7-5 sesuai AASTHO, sedangkan untuk LuSi yang distabilisasi dengan Ca(OH)₂ tergolong plastisitas rendah masuk kedalam A-5 sesuai AASTHO.

Tabel 1. Perbandingan Prosentase Bahan Stabilisasi yang Memberikan Hasil Optimum

Jenis Pengujian	Jenis Tanah		Satuan
	A	B	
a. Analisa Pembagian Butir			
- Fraksi Kerikil (<i>gravel</i>)	-	0	%
- Fraksi Pasir (<i>sand</i>)	0,67	6,14	%
- Fraksi Lanau - Lempung (<i>silt - clay</i>)	99,33	93,86	%
b. Volumetri dan Gravimetri			
- Spesifik Gravity, G _s	2,68	2,42	-
- Berat Volume Tanah, γ _t	-	1,789	gr/cm ³
- Berat Volume Kering, γ _d	1,386	1,374	gr/cm ³
- Kadar Air Optimum, W _{C-opt}	17,501	29,7	%
c. Konsistensi			
- Liquid Limit (LL)	49,52	65,67	-
- Plastic Limit (PL)	40,137	39,255	%
- Plasticity Index (PI)	9,386	26,415	%
d. Klasifikasi Tanah			
- USCS (<i>Unified Soil Classification System</i>)	OL/ML	OH/ML	-
- AASTHO (<i>American Association of State Highway and Transportation Officials Classification</i>)	A-5	A-7-5	-
e. Triaksial			
- Ø	66,34	26,053	°
- c	0,047	1,378	kg/cm ²
f. Daya Dukung			
- Kuat Tekan (<i>Unconfined Compression Test</i>)	1,44	-	kg/cm ²

Sumber : Data Sekunder

Keterangan :

- A = Lumpur Sidoarjo 90% + Kapur Ca(OH)₂ 10%, 20 hari
- B = Lumpur Sidoarjo 96% + Kapur CaO 4%

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

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

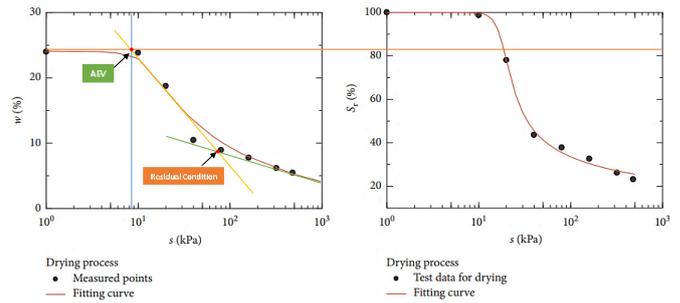
Pada **Gambar 1** merupakan tanah Yudong Silt yang tergolong plastisitas rendah A-4 menurut AASTHO, hubungan antara *matric suction* dan derajat kejenuhan atau kadar air digambarkan dalam persamaan Van Genuchten. Berdasarkan penelitian Indarto dkk [5] titik-titik baik

pengeringan dan pembasahan yang memiliki derajat kejenuhan 100% akan terletak pada garis lurus yang terdapat pada **Gambar 1**. Pada poin pertama adalah bila titik dimana garis lurus tersebut mulai berubah menjadi garis lengkung, adanya pori yang sangat besar mulai membuat tanah menjadi tidak jenuh yang biasa disebut “Air Entry Value” (AEV). Berdasarkan grafik yang terlihat pada **Gambar 1**, lekukan garis mulai terjadi pada kadar air (w) sekitar 23,9%. Jika dihubungkan dengan grafik lainnya akan setara dengan derajat kejenuhan (S_r) 83%, *suction* ($-U_w$) 8,5 kPa. Kemudian, poin kedua adalah “Residual Condition” dimana pada poin ini menghilangnya air pada tanah akan menjadi lebih sulit, yang berada pada nilai *suction* yang tinggi yakni hingga 1000 kPa. Nilai *Residual Condition* sebesar 6,5% yang dapat dilihat pada **Gambar 1**. Semua grafik SWCC akan memberikan karakteristik yang sama seperti yang dijelaskan diatas. Pada **Tabel 2** merupakan nilai *matric suction* pada berbagai kadar air (w) dapat digambarkan dalam sautu kurva yang dinamakan *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) [6].

Tabel 2. Nilai SWCC Yudong Silt

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

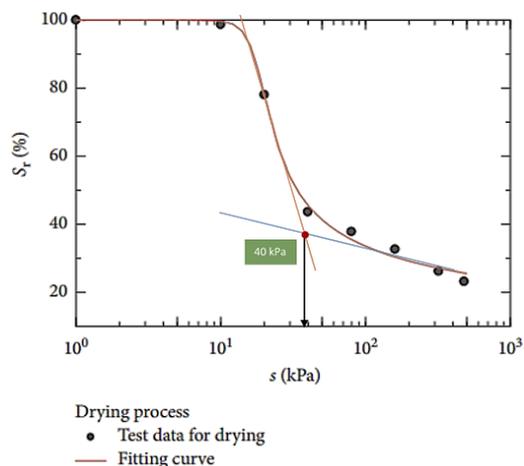
Sumber : Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018



Gambar 1. Nilai *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) Yudong Silt (Junran Zhang , ¹ Tong Jiang , ¹ Xingcui Wang,¹ Chong Liu,² and Zhiquan Huang¹, 2018)

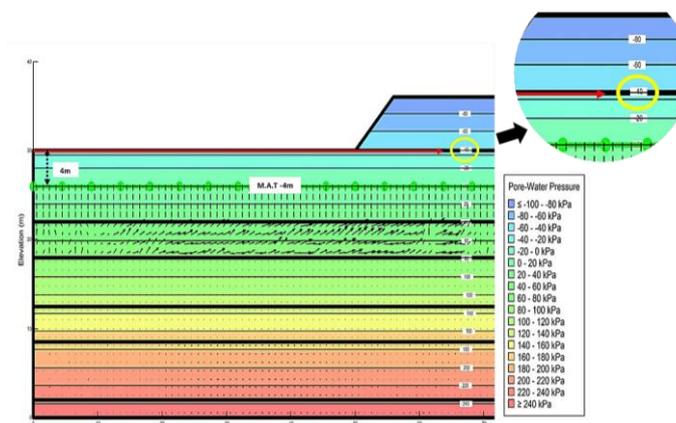
c. Validasi Parameter *Matric Suction* Hasil Pemodelan SEEP/W terhadap Model SWCC

Validasi kebenaran model SWCC sesuai dengan hasil pemodelan *SEEP/W* bertujuan untuk mengetahui proses pemodelan sudah berjalan dengan baik serta untuk mengetahui posisi nilai *suction* yang sesuai dengan kurva SWCC yang nantinya jika sudah sesuai dengan kebenaran model dari SWCC akan dilanjutkan ke tahap perhitungan *SLOPE/W*. Dilihat pada **Gambar 2**, data SWCC dari *Yudong Silt* (Plastisitas Rendah) terdapat nilai *suction* 40 kPa atau 0,4kg/cm² bila akan dinyatakan dalam tinggi kapiler, maka nilai hisapan pF dapat dikalibrasikan ke dalam cm. Nilai *suction* 40 kPa dikonversikan ke satuan tekanan menjadi 0,4 bar, kemudian akan dikonversikan kedalam satuan tinggi dengan hasil 4 m. Hasil posisi nilai *suction* 4 m terdapat di posisi atas elevasi muka air tanah yang dapat dilihat pada **Gambar 3**. Hasil validasi tersebut sesuai yang artinya kebenaran model *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) sudah terverifikasi dengan hasil pemodelan *SEEP/W* yang dilihat pada nilai *pore-water pressure*.



Gambar 2. *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) untuk validasi posisi nilai *matric suction*

Validasi kebenaran model SWCC sesuai dengan hasil pemodelan *SEEP/W* tidak berlaku untuk tanah yang berplastisitas tinggi. Hal tersebut terjadi karena pengaruh nilai *suction* yang tinggi sehingga menghasilkan nilai factor keamanan yang tidak masuk akal dan validasi sangat susah. Hal tersebut dikarenakan timbunan tanggul harus bersifat tetap jenuh. Maka dari itu, tidak bisa diketahui posisi dari nilai *suction*. Timbunan tanggul dengan menggunakan tanah yang berplastisitas tinggi belum pernah digunakan untuk jenis timbunan tanggul biasa. Tanah yang berplastisitas tinggi seringkali digunakan untuk *Natural Slope*. Dari pembahasan diatas dapat disimpulkan, bahwa penerapan tanggul untuk sungai, jalan, dan lainnya dapat digunakan dengan tanah yang mempunyai sifat plastisitas rendah dan tidak berlaku untuk plastisitas tinggi.



Gambar 3. Validasi hasil perhitungan SEEP/W sesuai dengan *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC)
Sumber : Data Primer

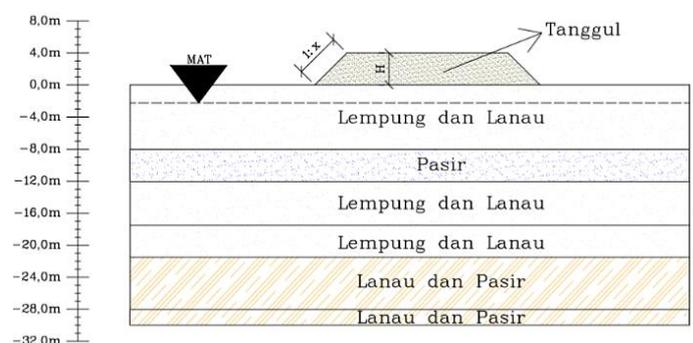
d. Stabilitas Tanggul LuSi dengan Memperhatikan Parameter *Matrix Suction*

Pemodelan tanggul ini dilakukan untuk mengetahui keamanan stabilitas lereng yang sudah mengalami perubahan iklim dengan memasukkan nilai *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC). Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian, kemiringan, elevasi muka air tanah dan tinggi endapan LuSi. Timbunan tanggul yang akan dimodelkan yaitu timbunan dengan tanah Yudong Silt (Plastisitas Rendah) yang telah dilakukan pendekatan data sekunder material LuSi yang distabilisasi dengan kapur. Penerapan pemodelan tanggul ini dapat digunakan untuk timbunan jalan, sungai atau lainnya. Nilai *matrix suction* yang digunakan sebagai parameter dengan nilai 1 kPa, 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa, dan 480 kPa. Pemodelan ini akan dianalisis dengan software geoteknik berupa *Geostudio* (SEEP/W dan

SLOPE/W). Pada lapisan tanah bawah tanggul memiliki kedalaman 30 m dengan 6 lapisan tanah yang berbeda.

- Pengaruh Elevasi Muka Air Tanah terhadap Stabilitas Tanggul

Pada pemodelan ini akan dilakukan berbagai variasi geometri tanggul pada timbunan yaitu ketinggian, kemiringan dan elevasi muka air tanah. **Gambar 4**, merupakan ilustrasi geometri tanggul dengan variasi elevasi muka air tanah yang berbeda-beda yaitu 2 m, 0 m, -0,5 m, -2 m dan -4 m. Konfigurasi variasi kemiringan tanggul (1:x) yaitu 1:1, 1:1.5 dan 1:2, sedangkan konfigurasi variasi tinggi timbunan tanggul (H) yaitu 6 m, 8 m, dan 10 m.



Gambar 4. Geometri tanggul dengan variasi elevasi muka air tanah dengan tanah timbunan berplastisitas rendah

Hasil dari pemodelan tanggul setelah melewati dari 2 tahap, yang pertama tahap proses *SEEP/W* terlebih dahulu kemudian dilanjutkan tahap kedua *SLOPE/W* didapatkan hasil seperti **Gambar 5**. Pada hasil pemodelan tanggul tersebut untuk tinggi tanggul 6 m, kemiringan 1:1 semakin rendah muka air tanahnya maka nilai faktor keamanan mengalami peningkatan seperti pada **Gambar 5.a**. Hal tersebut dikarenakan nilai *matrix suction* memberikan nilai besar yang membuat tegangan tanah menjadi lebih besar. **Gambar 5.b** dan **Gambar 5.c** juga mengalami hal yang sama dengan **Gambar 5.a** semakin rendahnya elevasi muka air tanah maka nilai faktor keamanan tanggul mengalami peningkatan yang membuat tanggul masih dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan nilai faktor keamanan lebih dari 1,25. Nilai faktor keamanan semakin besar akibat perubahan kemiringan suatu lereng yang semakin landai. Semakin tinggi elevasi muka air tanah dari dasar tanggul akan memperkecil angka keamanan tanggul. Pengaruh ketinggian tanggul yang dimodelkan adalah tinggi 6 m, 8 m dan 10 m, pada kelandaian yang sama, tanggul yang lebih tinggi mempunyai angka keamanan yang lebih

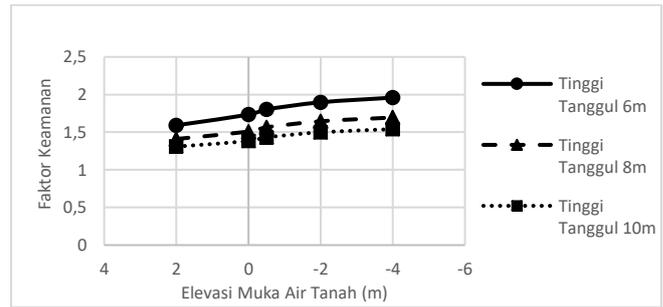
rendah yang dapat dilihat pada **Gambar 5**. Pengaruh kelandaian makin landai, angka keamanan makin besar pada tanggul yang mengalami peningkatan tegangan air pori negative (pengeringan). Faktor ketinggian tanggul juga berpengaruh terhadap angka keamanan tanggul dimana semakin tinggi tanggul angka keamanan semakin berkurang.

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

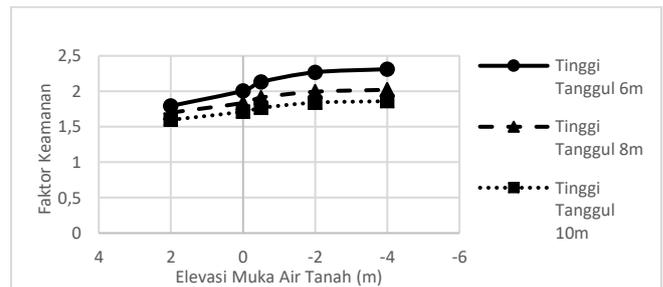
Perubahan fisik yang mungkin terjadi pada tanah akibat turun naiknya *matrix suction* antara lain adalah perubahan angka pori, kadar air dan derajat kejenuhan dari tanah, dari kondisi tanah cair sampai tanah mengalami kering dan keretakan. Sedangkan perubahan mekanik tanah akibat turun naiknya *matrix suction* umumnya adalah naik turunnya tegangan geser dan sudut geser dalam dari tanah.

Pengaruh *matrix suction* juga mempengaruhi tegangan geser tanah juga meningkat karena peningkatan *matrix suction*. Peningkatan tegangan geser tanah membuat tanggul dalam kondisi aman, jika terjadi berkurangnya tegangan geser tanah akibat berkurangnya *matrix suction* tanah dapat menyebabkan kelongsoran (*sliding*) yang membuat tanggul dalam kondisi tidak aman. Akibat dari perubahan-perubahan *matrix suction* yang terjadi pada tegangan geser tanah maka kemampuan daya dukung tanah pun akan berubah, dari kondisi paling kuat sampai tanah mengalami keruntuhan.

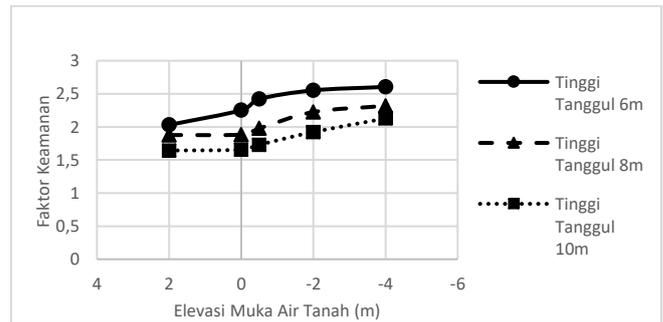
Pengaruh elevasi muka air tanah merupakan faktor yang mempengaruhi kestabilan pada tanggul, dengan adanya pengaruh *matrix suction* pada keberadaan tanggul juga mempengaruhi pula kestabilan yang terjadi pada tanggul.



(a)



(b)



(c)

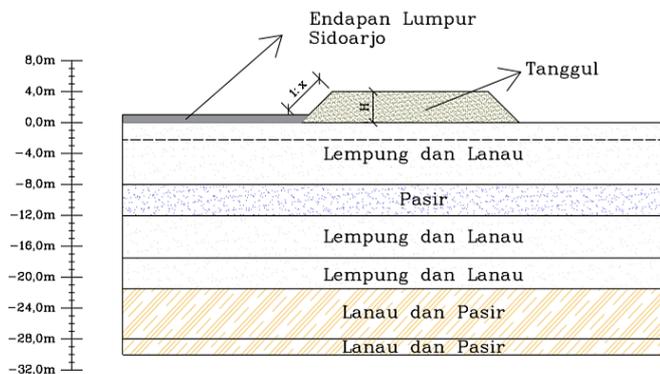
Gambar 5. Kurva hasil pemodelan tanggul muka air tanah dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1.5; c) Kemiringan 1:2

Sumber : Data Primer

- Pengaruh Tinggi Endapan LuSi terhadap Stabilitas Tanggul

Pemodelan ini digambarkan dengan geometri yang dapat dilihat pada **Gambar 6**, merupakan ilustrasi geometri tanggul dengan variasi endapan LuSi yang berbeda-beda yaitu 1 m, 3 m, 5 m, 7 m dan 9 m. Konfigurasi kemiringan tanggul (1:x) yaitu 1:1, 1:1.5 dan 1:2, sedangkan konfigurasi variasi tinggi timbunan tanggul (H) yaitu 6 m, 8 m, dan 10 m. Endapan LuSi yang akan dimodelkan pada GeoStudio ini menggunakan data sekunder dari penelitian Balai Litbang Sungai, Puslitbang Sumber Daya Air Kementrian PUPR [1] yaitu data kondisi

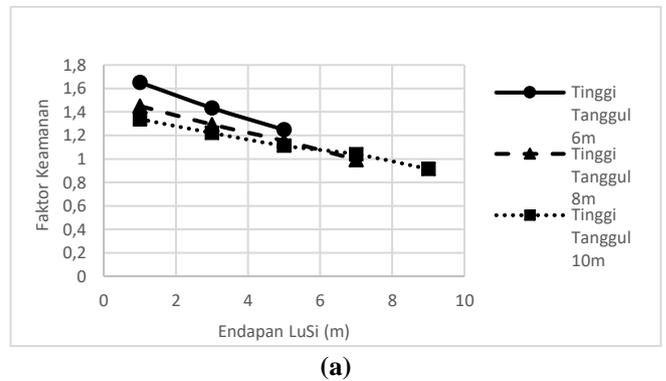
initial 100% LuSi dengan memasukkan nilai kepadatan = 1,44 gr/cm³, nilai kohesi sebesar 0,0627 kg/cm² dan nilai sudut geser sebesar 22,83°.



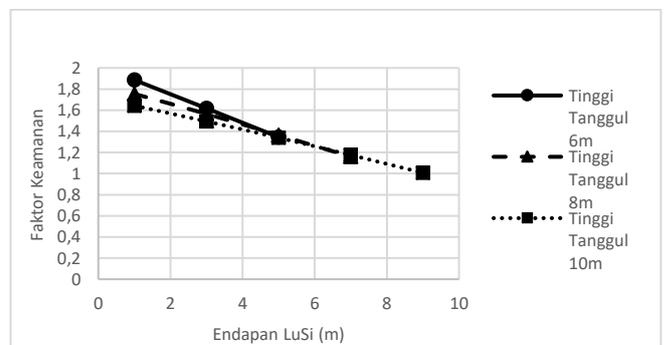
Gambar 6. Geometri tanggul dengan variasi tinggi endapan LuSi dengan tanah timbunan berplastisitas rendah.

Penerapan pemodelan tanggul ini dapat digunakan untuk timbunan tanggul LuSi di Porong, Jawa Timur. Hasil dari pemodelan tanggul dengan variasi endapan LuSi setelah melewati dari 2 tahap, yang pertama tahap proses SEEP/W terlebih dahulu kemudian dilanjutkan tahap kedua SLOPE/W didapatkan hasil seperti **Gambar 7.a**. Pada hasil pemodelan tanggul tersebut untuk tinggi tanggul 6 m, kemiringan 1:1 semakin tebal atau dalam endapan LuSinya maka nilai faktor keamanan mengalami penurunan seperti **Gambar 7.a**. Hal tersebut juga terjadi sama pada **Gambar 7.b** dan **Gambar 7.c**. Nilai faktor keamanan tanggul dengan variasi endapan LuSi mengalami penurunan dengan semakin tingginya tanggul yang membuat tanggul masih dalam kondisi Longsor bisa terjadi/sering (Lereng Stabil) dengan nilai factor keamanan kurang dari 1,07 pada kemiringan 1:1 dengan tinggi tanggul 8 m serta kedalaman 7 m dan terjadi pada kemiringan 1:1 dengan tinggi tanggul 10m serta kedalaman LuSi 7-9 m. Kondisi tinggi endapan LuSi yang berbeda, semakin tinggi endapan LuSi, maka nilai faktor keamanan mengalami penurunan. Pada variasi kemiringan tanggul dan tinggi tanggul nilai faktor keamanan tanggul mengalami penurunan yang membuat tanggul dalam 3 kondisi berbeda. Kondisi dengan kemiringan 1:2, tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m. Mendapatkan nilai faktor keamanan yang tinggi, tanggul dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan nilai factor keamanan lebih dari 1,25. Pengaruh paling besar terjadi pada tinggi endapan LuSi yang membuat tegangan geser tanah mengalami penurunan atau kemampuan daya dukung tanah berubah. Semakin tinggi endapan LuSi

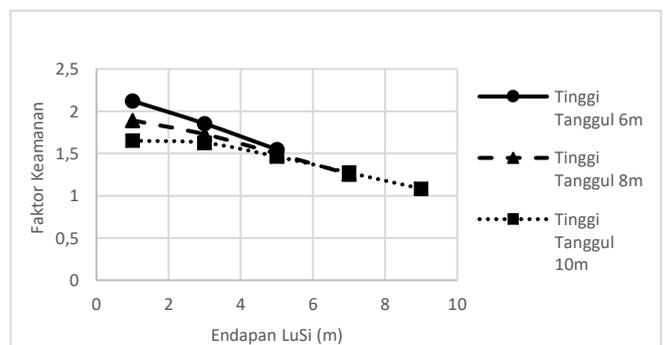
pada samping tanggul maka akan mempengaruhi kestabilan tanggul yang mengakibatkan tanah mengalami keruntuhan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 7. Kurva hasil pemodelan tanggul endapan LuSi dengan berbagai variasi yang berbeda : a) Kemiringan 1:1; b) Kemiringan 1:1,5; c) Kemiringan 1:2

Sumber : Data Primer

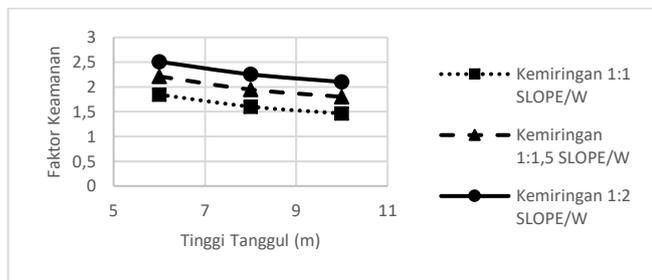
Hasil kedua pemodelan tersebut dengan variasi elevasi muka air tanah dan tinggi endapan LuSi dengan penerapan nilai *matric suction*, bahwa semakin curam kemiringan tanggul maka nilai faktor keamanan semakin kecil, yang artinya semakin landai tanggul maka nilai faktor keamanan

semakin besar atau dapat dikatakan tanggul dalam kondisi aman.

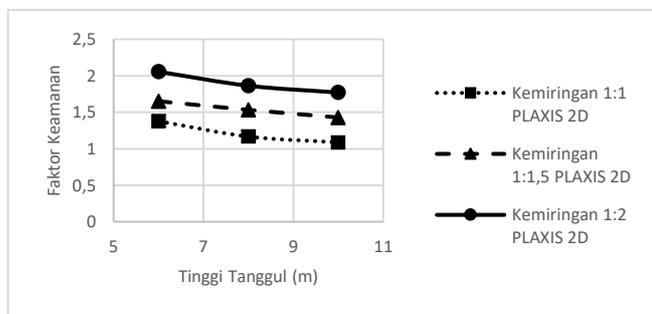
e. Perbandingan Faktor Keamanan dengan GeoStudio dan PLAXIS 2D

Hasil nilai faktor keamanan pada **Gambar 8** menunjukkan bahwa semakin tinggi tanggul maka nilai faktor keamanan tanggul yang dialami akan mengalami penurunan. Hal tersebut untuk kondisi tanah Yudong Silt (Plastisitas Rendah) pada variasi kemiringan pada tanggul.

Perbedaan hasil nilai faktor keamanan tersebut juga dipengaruhi pada input parameter atau data, yang dimana pada PLAXIS 2D tidak memasukkan nilai *matric suction* pada timbunan tanggul, sedangkan SLOPE/W memasukkan nilai *matric suction* pada timbunan tanggul.



(a)



(b)

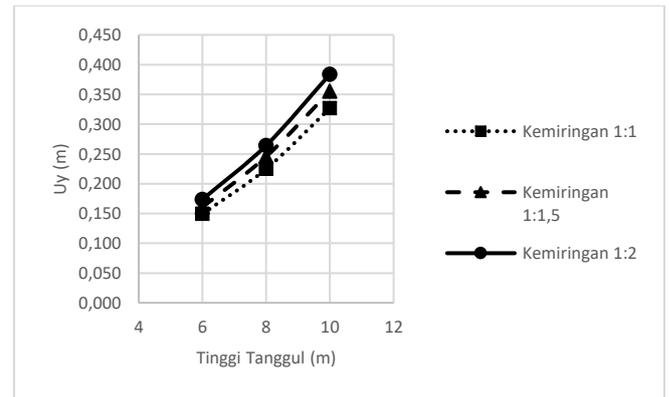
Gambar 8. Kurva hasil faktor keamanan tanggul pada : a) PLAXIS 2D ; b) SLOPE/W

Sumber : Data Primer

Hasil faktor keamanan pada tanggul dengan 2 jenis software geoteknik yang berbeda, dapat dilihat terdapat perbedaan hasil diantara keduanya yaitu hasil faktor keamanan dengan SLOPE/W menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih besar dibandingkan dengan PLAXIS 2D. Hal tersebut terjadi pada tanggul dengan variasi kemiringan, ketinggian tanggul dan adanya pengaruh pada nilai *matric suction* (perubahan iklim).

f. Perhitungan Penurunan Segera (*Immediate Settlement*) pada Tanggul

Gambar 9 menunjukkan bahwa besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi distabilisasi kapur terjadi penurunan pada tanggul. Nilai penurunan berkisar 14 - 40 cm setiap 200 hari, penurunan tanggul terjadi penurunan yang juga disebabkan oleh geometri tanggul dengan variasi tinggi dan kemiringan.



Gambar 9. Kurva hasil penurunan segera tanggul dengan PLAXIS 2D

Sumber : Data Primer

4. Simpulan

Pemodelan tanggul dengan material LuSi distabilisasi kapur dapat dimanfaatkan sebagai bahan timbunan tanggul, setelah dilakukan penerapan nilai *matric suction* pada *Soil-Water Characteristic Curve* (SWCC) untuk melihat perubahan kadar air akibat faktor perubahan iklim. Pengaruh *matric suction* juga dipengaruhi oleh elevasi muka air tanah dan tinggi endapan LuSi. Nilai *matric suction* yang digunakan sebagai parameter dengan nilai 1 kPa, 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, 320 kPa, dan 480 kPa sangatlah berpengaruh pada stabilitas tanggul dan relasi nilai angka keamanan tanggul.

Pengaruh nilai *matric suction* juga dipengaruhi oleh elevasi muka air tanah dan tinggi endapan LuSi. Berbagai variasi ketinggian dan kemiringan yang dihasilkan dari elevasi muka air tanah, nilai faktor keamanan tanggul mengalami peningkatan yang membuat tanggul masih dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan rentang faktor keamanan 1,3–2,6 pada kondisi geometri tanggul dengan kemiringan (1:1, 1:1.5 dan 1:2) dari variasi tinggi tanggul 6-10 m. Hasil pengaruh dari tinggi endapan LuSi mengalami penurunan akibat tinggi endapan LuSi, serta adanya variasi geometri tanggul (tinggi dan kemiringan tanggul) yang membuat keamanan tanggul terdapat 3 kondisi. Kondisi pertama, pengaruh tinggi endapan LuSi dengan kemiringan

tanggul 1:1 dengan tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai factor keamanan tanggul 1,29–1,65. Kondisi kedua, dengan kemiringan tanggul 1:2 dengan tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-9 m mendapatkan nilai factor keamanan tanggul 1,3–1,8. Kondisi Ketiga, pengaruh tinggi endapan LuSi dapat dikatakan dengan kemiringan 1:2, tinggi timbunan mulai dari 6-10 m, dan tinggi endapan LuSi yang bervariasi dari 1-7 m mendapatkan nilai faktor keamanan tanggul dalam kondisi longsor jarang terjadi (aman) dengan rentang factor keamanan 1,25–2,12. Besar penurunan segera (*Immediate Settlement*) dari tanggul yang terbuat dari material LuSi yang distabilisasi kapur, dengan nilai penurunan berkisar 14 - 40 cm setiap 200 hari untuk variasi tinggi (6-10 m) dan kemiringan tanggul (1:1, 1:1.5 dan 1:2). Penurunan pada tanggul tersebut berpengaruh pada geometri pemodelan pada variasi tinggi dan kemiringan tanggul.

Daftar Pustaka

- [1] R. P. Kegiatan, “Rencana Pelaksanaan Kegiatan Konsep Pedoman (R-O) Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo Untuk Material,” 2019.
- [2] I. N. Sinarta, “Tegangan Pori Negatif Sebagai Parameter Stabilitas Lereng Tanah Tak Jenuh (Soil Mechanics On Unsaturated Soil),” *Paduraksa*, vol. 5, p. 31–42, 2016.
- [3] I. Faizah and N. E. Mochtar, “Peningkatan Perilaku Lumpur Sidoarjo (Lusi) dengan Bahan Additive untuk Material Urugan,” in *Prosiding Seminar Aplikasi Teknologi Prasarana Wilayah* p. D9-14, 2013.
- [4] P. Beban, K. Dan, and A. Alfani, “Modul 4, Spesifikasi Umum Divisi 3-Pekerjaan Tanah dan Geosintetik,” 2017.
- [5] E. Ester “Perilaku Tanah Ekspansif Tidak Terganggu di Citraland Surabaya yang Mengalami Perubahan Fase Akibat Pengeringan dan Pembasahan”, 2013.
- [6] J. Zhang, T. Jiang, X. Wang, C. Liu, and Z. Huang, “Influences of Drying and Wetting Cycles and Compaction Degree on Strength of Yudong Silt for Subgrade and Its Prediction,” *Adv. Civ. Eng.*, 2018, doi: 10.1155/2018/1364186.
- [7] D. G. Fredlund and H. Rahardjo, “Measurements of Soil Suction,” *Soil Mech. Unsaturated Soils*, p. 64–106, 2007, doi: 10.1002/9780470172759.ch4.

