



Simulasi Angka Keamanan Menggunakan Metode Elemen Hingga Berdasarkan Nilai Kohesi (c) dan Sudut Geser Dalam (ϕ)

Putera Agung Maha Agung¹, Zaindra Fakhri Salim², Aida Nurfitri³, Aldo Wirastana Adinegara⁴

^{1,2,3}Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

⁴Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

¹putera.agungmagung@sipil.pnj.ac.id, ²zaindra.fakhri.salim.ts21@mhs.w.pnj.ac.id, ³aida.nurfitri.ts21@mhs.w.pnj.ac.id,

⁴aldo.wirastana@ui.ac.id

Abstract

Expansive soil is a type of soil that can expand and shrink based on the moisture content. In Cisauk Subdistrict, Tangerang City, there are many damages to building structures and/ or roads caused by the expansive soil. This research is intended to identify the expansive soil, including its physical characteristics, in determining the cohesion (c) and internal shear angle (ϕ) values using the UU (unconsolidated undrained) triaxial test. Test results indicated that the cohesion value was around 0.33 kg/cm² or 32.94 kN/m², and an internal shear angle of 20.51°. Both datasets were used to analyze slope stability modeling in defining the safety factor (SF) using PLAXIS software in 2D during rainy and dry seasons. Each condition was evaluated by the three slope variations, such as 20°, 40°, and 60°. Modeling results show that the (SF) would be higher on flatter slopes, and on the contrary, would decrease on steeper slopes. In addition, the (SF) would be higher during the dry season than the rainy season. The soil condition would be more saturated during the rainy season.

Keywords: Safety Factor, Cohesion, Internal Angle of Friction, Expansive Soil, Triaxial UU

Abstrak

Tanah ekspansif adalah jenis tanah yang memiliki kemampuan untuk mengembang dan menyusut tergantung pada kadar air yang dikandungnya. Di Kecamatan Cisauk, Kota Tangerang, banyak sekali kerusakan pada struktur bangunan dan/ atau jalan akibat tanah ekspansif. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi tanah ekspansif termasuk karakteristik fisiknya dalam menentukan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dengan menggunakan uji triaksial UU (unconsolidated undrained). Hasil pengujian menunjukkan nilai kohesi sebesar 0,33 kg/cm² atau 32,94 kN/m² dan sudut geser dalam sebesar 20,51°. Kedua data ini digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan menggunakan perangkat lunak *software* PLAXIS, yang dilakukan dua kali untuk kondisi musim hujan dan kemarau. Setiap kondisi diuji pada tiga variasi kemiringan lereng, yaitu 20°, 40°, dan 60°. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan (FK) lebih tinggi pada lereng yang lebih landai dan menurun seiring dengan kemiringan yang curam. Selain itu, (FK) lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan musim hujan. Kondisi tanah akan menjadi kadar air akan menjadi lebih jenuh saat musim hujan.

Kata kunci: Angka Keamanan, Kohesi, Sudut Geser Dalam, Tanah Ekspansif, Triaxial UU.

Diterima Redaksi : 2024-08-26 | Selesai Revisi : 2025-02-14 | Diterbitkan Online : 2025-11-12

1. Pendahuluan

Perkembangan infrastruktur di daerah-daerah tropis seperti banyak daerah di Indonesia sering kali mengalami masalah tidak stabilnya tanah yang akhirnya menimbulkan permasalahan pada konstruksi. Salah satu faktor yang menyebabkan permasalahan ini adalah tanah yang mengalami pengembangan dan penyusutan mengikuti kadar air tanah tersebut. Tanah yang memiliki sifat ini disebut dengan tanah ekspansif. Jalan yang dibangun di atas tanah ekspansif dapat mengalami kerusakan akibat perubahan volume tanah [1].

Tanah merupakan lapisan permukaan bumi yang terbentuk atas mineral dan bahan organik melalui proses pelapukan dan dekomposisi bahan organik [2]. Tanah ekspansif terbentuk dari pelapukan batuan yang dapat mengalami perubahan ukuran akibat fluktuasi kelembaban [3]. Tanah ini akan mengalami ekspansi saat kadar air (w_c) meningkat, seperti pada musim hujan, dan menyusut ketika kadar air (w_c) berkurang, seperti pada musim kemarau [4]. Sebagai hasil dari perubahan kelembaban ini, volume tanah ekspansif akan bervariasi secara signifikan seiring dengan perubahan iklim atau cuaca pada lokasi tanah tersebut.



Tabel 1. Derajat Pengembangan Tanah (AASHTO) [5]

Derajat Kembang-Susut	LL (%)	PI (%)
Rendah	< 50	< 25
Sedang	50 – 60	25 – 35
Tinggi	> 60	> 35

Mengutip pada Tabel 1, tanah dengan nilai batas cair (*LL*) lebih dari 60% dan nilai plastisitas indeks (*PI*) lebih dari 35 % dapat dikatakan sebagai tanah dengan derajat pengembangan yang tinggi dan memiliki potensi perubahan volume tanah yang tinggi.

Banyak daerah di Kabupaten Tangerang yang tidak luput dari permasalahan tanah ekspansif. Keadaan tanah yang dipengaruhi oleh cuaca terutama daerah yang berdekatan dengan sungai maupun sumber air lainnya memiliki potensi tanah ekspansif. Contoh pengaruh tanah ekspansif terjadi di daerah sekitar Jalan JLS, Kranggan, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten. Dengan kondisi daerah pemukiman yang berdekatan dengan Sungai Cisadane, jalan-jalan di sekitar daerah tersebut mengalami retak dan patah.

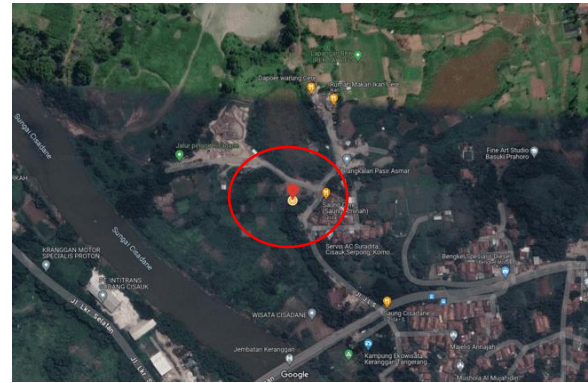
Tanah memiliki sifat-sifat fisik dan mekanis yang dapat mempengaruhi desain dan konstruksi struktur bangunan [6]. Oleh karena itu dibutuhkan pengujian tanah untuk mengetahui karakteristik atau sifat dari tanah yang diuji, terutama jenis tanah ekspansif yang dapat mengembang maupun menyusut bahkan cenderung kaku mengikuti cuaca [7].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanis tanah, serta untuk mengetahui besaran deformasi yang terjadi serta angka keamanan (*FK*) pada tanah menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software PLAXIS*. Variabel utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (ϕ) yang kemudian kedua variabel tersebut digunakan untuk mencari nilai angka keamanan (*FK*) dari simulasi kemiringan yang dipilih.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi studi

Lokasi yang dijadikan sebagai sampel penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. yaitu berada di sekitar Jalan JLS, Kranggan, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten.



Gambar 1. Lokasi Sampel Penelitian

2.2 Tahapan penelitian

Dalam melaksanakan penelitian ini, terdapat beberapa tahapan untuk mencapai tujuan penelitian dengan penjelasan sebagai berikut:

1. **Studi pendahuluan.** Pada tahap ini, dilakukan proses peninjauan literatur serta identifikasi penelitian terdahulu untuk menemukan permasalahan.
2. **Penentuan lokasi penelitian.** Setelah menemukan permasalahan, selanjutnya adalah penentuan lokasi penelitian yang memenuhi kriteria permasalahan yang dapat menunjang kemajuan penelitian.
3. **Pengambilan sampel.** Setelah lokasi ditentukan, langkah selanjutnya adalah mengambil sampel tanah terganggu (*disturbed sample*) untuk digunakan sebagai bahan penelitian di laboratorium pada kedalaman 1,5 m di bawah permukaan tanah.
4. **Analisis laboratorium.** Langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian laboratorium untuk menemukan sifat fisik dan mekanik (triaksial UU (*unconsolidated undrained*) dengan menggunakan sampel *remoulded*) dari tanah.
5. **Analisis data.** Setelah penelitian menghasilkan data, Langkah selanjutnya adalah pengolahan data hasil penelitian serta memahami hasil penelitian dan melakukan pengolahan menggunakan *software PLAXIS*.
6. **Interpretasi hasil.** Langkah selanjutnya adalah mendiskusikan hasil analisis dan temuan penelitian.
7. **Kesimpulan dan saran.** Terakhir adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian terkait perilaku kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (ϕ) lapisan tanah ekspansif pada lokasi penelitian.

2.3 Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat data primer yang diambil dan diolah secara langsung melalui pengujian laboratorium. Data yang dikumpulkan berupa sifat fisik dan mekanis tanah meliputi pengujian berikut:

1. **Pengujian fisik:** Batas-batas Atterberg, analisis ayak, hidrometer, berat-volume, berat isi butir, sifat-sifat fisik (*index or material properties*).
2. **Pengujian mekanis:** Pemadatan standar, triaksial UU (*unconsolidated undrained*).

2.4 Analisis data

Dalam melakukan analisis data, metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan serangkaian pengujian sifat fisik tanah.
2. Melakukan pengujian triaksial UU di laboratorium.
3. Melakukan olah data dengan menggunakan software Microsoft Excel.
4. Melakukan analisis deformasi jalan menggunakan software PLAXIS.
5. Melakukan perhitungan angka keamanan (*FK*) dengan metode elemen hingga.

2.5 Teori kekuatan geser tanah (*shear strength*)

Dua parameter penting yang akan dijelaskan dalam bagian ini adalah kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (ϕ). Parameter-parameter ini sangat berguna untuk mengevaluasi potensi longsor di daerah studi dan dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (*FK*).

2.6 Kohesi (*c*)

Kohesi (*c*) merupakan gaya tarik-menarik antar partikel dalam suatu material tanah yang mempengaruhi kekuatan geser, meskipun tanpa adanya tekanan luar. Nilai kohesi yang tinggi umumnya ditemukan pada tanah berlempung yang memiliki sifat plastis dan mampu mempertahankan bentuknya dalam kondisi kering maupun jenuh air [8]. Kohesi (*c*) tanah akan bekerja di sepanjang bidang longsor. Kegagalan kohesi (*c*) lebih ditentukan oleh kadar air tanah (w_c).

2.7 Sudut geser dalam (ϕ)

Sudut geser dalam (ϕ) adalah parameter mekanis yang menggambarkan tingkat ketahanan suatu tanah terhadap gaya geser yang bekerja padanya. Semakin besar nilai sudut geser dalam (ϕ), semakin tinggi kemampuan tanah dalam menahan gaya geser sebelum mengalami kegagalan. Parameter ini sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng serta desain fondasi dan struktur geoteknik lainnya [9]. Sudut geser dalam adalah besarnya bidang kontak antara butiran tanah yang saling mengunci satu sama lain dan ikatan yang kuat. Perubahan sudut geser dalam (ϕ) juga disebabkan oleh perubahan kadar air (w_c) yang terjadi saat musim hujan dan musim kemarau.

2.8 Faktor keamanan (*FK*)

Faktor keamanan (*FK*) merupakan rasio antara kekuatan tahanan geser tanah terhadap tegangan geser yang terjadi akibat pembebanan luar dan perubahan kadar air (w_c). Nilai faktor keamanan (*FK*) lebih dari satu menunjukkan bahwa kondisi tanah masih dalam batas aman,

sedangkan nilai kurang dari satu mengindikasikan potensi ketidakstabilan atau kegagalan tanah. Faktor ini digunakan sebagai salah satu indikator utama dalam analisis stabilitas lereng, desain fondasi, serta berbagai perancangan teknik sipil lainnya [10].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data hasil pengujian

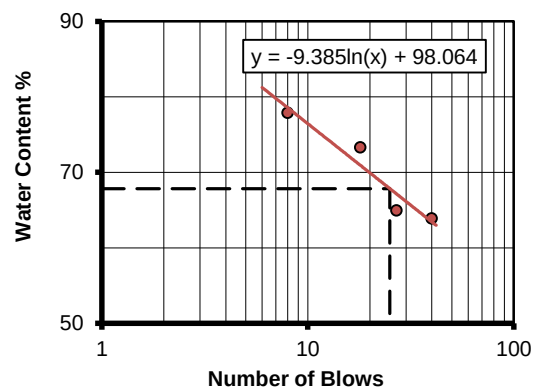
Pengujian yang dilakukan meliputi uji klasifikasi tanah, pengujian berat isi, dan pengujian triaksial UU menggunakan sampel tanah yang terganggu (*disturbed*).

3.1.1 Pengujian batas-batas Atterberg

Batas Atterberg disebut juga sebagai batas-batas konsistensi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui batas cair (*LL*) dan plastisitas tanah (*PI*) berdasarkan kadar airnya melalui pengujian laboratorium. Nilai (*LL*) dan (*PI*) dapat digunakan untuk menentukan potensi ekspansif tanah. Pengujian ini menggunakan standar ASTM D 4318 [11].

Tabel 2. Tabel Batas-Batas Atterberg

Number of blows	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)
40	63,89	-
27	64,97	-
18	73,29	-
8	77,91	-
-	-	32,81
-	-	32,30



Gambar 2. Grafik Batas Cair (LL)

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2, didapat nilai (*LL*) sebesar 67,85% dan (*PL*) sebesar 32,55%. Nilai (*PI*) dihitung sebesar 35,30%. Berdasarkan tabel AASHTO, tanah dengan (*LL*) > 60% dan (*PI*) > 35% tergolong sebagai lapisan tanah ekspansif dengan derajat kembang-susut yang tinggi hingga sangat tinggi.

3.1.2 Pengujian distribusi butir

Pengujian distribusi butir dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah dengan menggunakan

metode ayak dan hidrometer. Standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah ASTM D7928 [12].

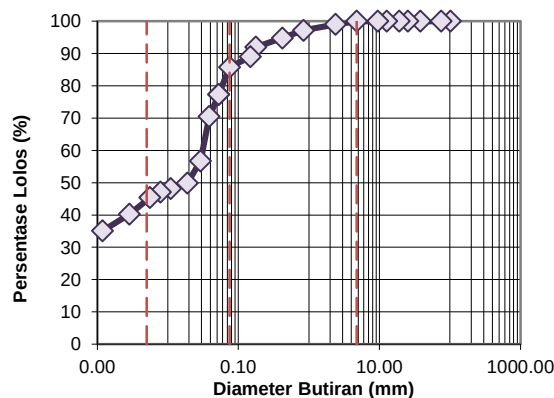
Tabel 3. Hasil Analisa Ayak

Sieve No.	Sieve opening (mm)	Weight retained (g)	Percent retained (%)	Cumulative percent retained (%)	Percent finer (%)
4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,0
8	2,38	0,50	1,00	1,00	99,0
20	0,84	0,90	1,80	2,80	97,2
40	0,42	1,20	2,40	5,20	94,8
80	0,18	1,40	2,80	8,00	92,0
100	0,15	1,50	3,00	11,0	89,0
200	0,08	1,60	3,20	14,2	85,8
Pan	-	42,9	85,8	85,8	-

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, didapatkan bahwa 85,80% dari total tanah tergolong tanah berbutir halus. Dengan demikian, tanah ini diklasifikasikan sebagai tanah berbutir halus berdasarkan standar USCS dan AASHTO.

Tabel 4. Hasil Pengujian Hidrometer

Elapsed time (min)	Hidrometer reading	Corrected reading	Diameter (mm)	Percent finer (%)
0.5	43.0	45.1	0.053	77.336
1	39.0	41.1	0.039	70.469
2	31.0	33.1	0.029	56.736
5	27.0	29.1	0.019	49.869
15	26.0	28.1	0.011	48.152
30	25.0	27.4	0.008	47.079
60	24.0	26.4	0.006	45.363
240	21.0	23.4	0.003	40.213
1440	18.0	20.4	0.001	35.063



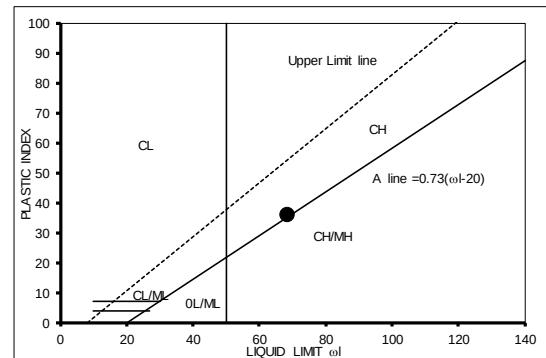
Gambar 3. Grafik Distribusi Butir

Setelah menggabungkan hasil analisis ayak pada Tabel 3 dan hidrometer pada Tabel 4, Gambar 3 menunjukan tanah ini mengandung 44,24% lempung (*clay*), 41,56% lanau (*silt*), dan 14,20% pasir (*sand*).

3.1.3 Klasifikasi tanah

Klasifikasi tanah dilakukan menggunakan standar AASHTO dan USCS berdasarkan hasil pengujian distribusi butir dan batas-batas Atterberg.

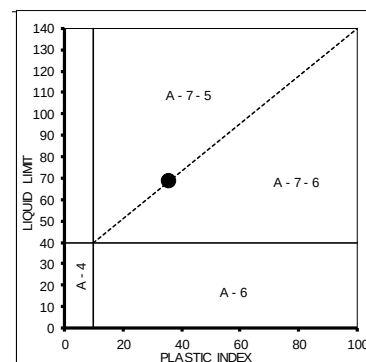
- **Klasifikasi USCS:** Tanah diklasifikasikan sebagai tanah lempung CH.



Gambar 4. Klasifikasi Tanah (USCS) [13]

Hasil penelitian pada Gambar 4 menunjukkan bahwa tanah tergolong CH (lempung anorganik dengan plastisitas tinggi), yang memiliki kohesi tinggi namun rentan terhadap perubahan kadar air.

- **Klasifikasi AASHTO:** Tanah dikategorikan sebagai tanah A-7-5 atau tanah berlempung.



Gambar 5. Klasifikasi Tanah (AASHTO) [14]

Hasil penelitian pada Gambar 5 menunjukkan bahwa tanah tergolong A-7-5 berdasarkan klasifikasi AASHTO, yang merupakan tanah lempung dengan plastisitas tinggi dan daya dukung rendah.

Hasil menunjukan tanah yang diklasifikasikan sebagai CH (*clay high plasticity*) dan A-7-5 (AASHTO), kedua jenis tersebut memiliki plastisitas tinggi serta daya dukung rendah, yang rentan terhadap perubahan volume akibat kadar air. Karakteristik ini memenuhi sifat tanah ekspansif dan membutuhkan penanganan lebih lanjut saat digunakan dalam konstruksi..

3.1.4 Aktivitas (*activity*) atau (A)

Potensi pengembangan tanah dihitung menggunakan nilai aktivitas tanah (A) dengan formula dari Skempton [15] yang dimodifikasi oleh Seed [16].

$$A = \frac{PI}{C - 10} \quad [16]$$

Dengan PI sebagai nilai indeks plastisitas, (C) sebagai persen lebih halus dari 0,002 mm dan 10% sebagai faktor reduksi untuk tanah hasil pemadatan.

$$A = \frac{35,30}{37,582 - 10}$$

$$A = 1,280$$

Dengan nilai aktivitas (*A*) sebesar 1,280, tanah ini diklasifikasikan sebagai tanah aktif, dengan potensi pengembangan yang tinggi.

3.1.5 Pengujian berat-volume tanah (*density*) (γ)

Pengujian berat-volume dilakukan untuk menentukan massa tanah dalam satu satuan volume, yang mencakup berat volume basah (*wet density*) dan berat volume kering (*dry density*). Berdasarkan hasil pengujian, nilai *wet density* sebesar 1,715 gr/cm³, menunjukkan berat tanah dalam kondisi mengandung air. Sementara itu, nilai *dry density* sebesar 1,220 gr/cm³ menggambarkan berat tanah setelah kadar airnya dihilangkan melalui proses pengeringan.

3.1.6 Pengujian berat isi butir (*specific gravity*) (G_s)

Berat isi butiran tanah (G_s) merupakan perbandingan antara berat volume tanah (*density*) dengan berat volume air pada suhu standar (artinya tanpa satuan). Berdasarkan hasil pengujian, nilai (G_s) tanah yang diperoleh adalah 2,648, yang menunjukkan bahwa partikel tanah tersebut memiliki massa 2,648 kali lebih besar dibandingkan massa air dalam volume yang sama.

3.1.7 Pengujian sifat-sifat fisik (*index properties*)

Index properties dihitung dengan menggabungkan beberapa parameter dari pengujian sebelumnya. Parameter-parameter yang digabungkan adalah divalidasi dari semua pengujian yang telah dilakukan.

Tabel 5. Hasil pengujian sifat fisik tanah

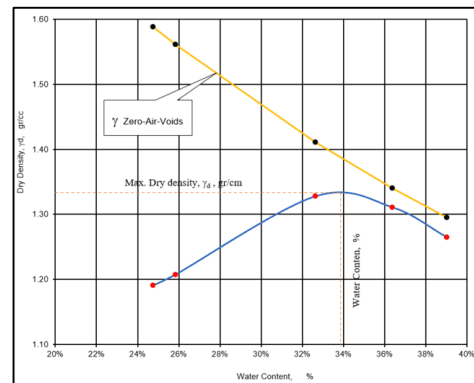
Properties	Notasi	Nilai
Berat tanah basah	W_t	90,10 gr
Volume tanah basah	V_t	52,52 cc
Berat volume	γ	1,72 gr/cc
Berat isi butir	G_s	2,65
Kadar air	w_c	40,56%
Berat isi kering	γ_d	1,22 gr/cc
Porositas	n	0,54
Derajat kejenuhan	S_r	92,16%

Hasil pengujian indeks properties seperti pada Tabel 5 menunjukkan bahwa tanah yang diuji memiliki karakteristik fisik yang mencerminkan tingkat kepadatan, kadar air, dan kejenuhan yang tinggi. Kondisi ini berpengaruh terhadap stabilitas serta daya dukung tanah, terutama dalam kondisi beban eksternal atau perubahan lingkungan.

Secara umum hasil pengujian sifat-sifat fisik ini telah mengindikasikan bahwa lapisan tanah yang diuji memiliki potensi kembang-susut yang besar. Dengan demikian, lapisan tanah memiliki potensi merusak struktur yang berada di atasnya.

3.1.8 Uji pemadatan standar (*standard proctor test*)

Pengujian ini untuk menentukan kadar air optimum dan *maximum dry density* dengan ASTM D 698 [17].



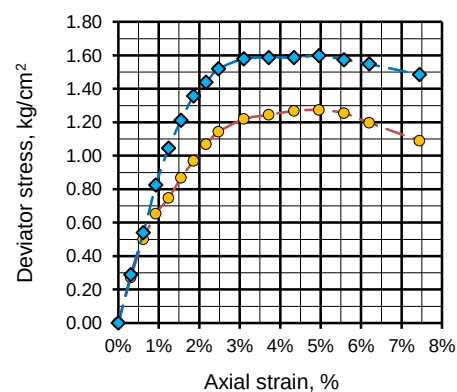
Gambar 6. Grafik Hubungan W_c dan γ_d

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium seperti pada Gambar 6, kadar air optimum atau OMC (*optimum moisture content*) tanah pada lokasi penelitian adalah sebesar 33,95%, sedangkan nilai *maximum dry density* yang diperoleh adalah 1,339 gr/cc.

Dari Gambar 6, terlihat bahwa sisi kering sangat lambat atau sulit mencapai kondisi kadar air optimum (OMC), namun sangat cepat mencapai kondisi basah maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan tanah sangat mudah kembang-susut saat musim hujan akibat proses infiltrasi air hujan.

3.1.9 Uji triaksial UU (*unconsolidated undrained*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respon tanah terhadap pembebanan multiarah (arah aksial dan arah lateral atau deviator) sesuai dengan tipe pengujian *unconsolidated undrained* (UU) dengan standar ASTM D2850 [18]. Berikut adalah hasil dari uji triaksial UU untuk menentukan nilai kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (ϕ) yang akan digunakan dalam simulasi kelongsoran:

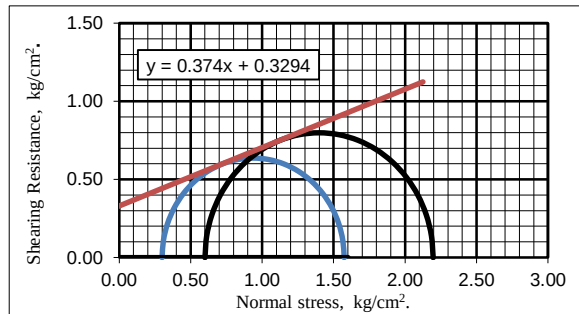


Gambar 7. Grafik hubungan regangan dan tegangan

Berdasarkan grafik pada Gambar 8, didapat parameter berupa tegangan-tegangan (aksial (σ_1) dan deviator (σ_3)) sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Tegangan-Tegangan Dari Uji Triaksial UU

No.	Nama	Satuan	Sampel 1	Sampel 2
1	σ_1	kg/cm ²	1,573	2,197
2	σ_3	kg/cm ²	0,300	0,600
3	$\sigma_1 - \sigma_3$	kg/cm ²	1,273	1,597

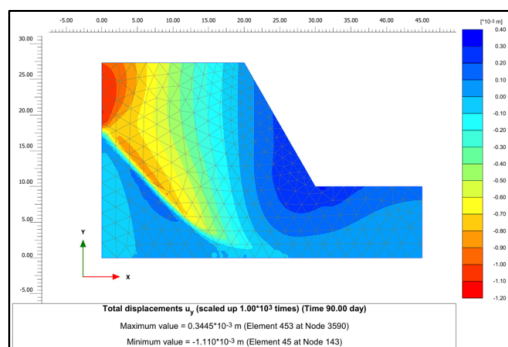


Gambar 8. Lingkaran Mohr dalam Menentukan (c) dan (ϕ)

Berdasarkan pada data dari Tabel 6 yang kemudian dibuat lingkaran Mohr pada Gambar 8, didapatkan hasil berupa nilai kohesi (c) sebesar 0,33 kg/cm² atau 32,94 kN/m² dengan sudut geser dalam (ϕ) adalah 21,506°.

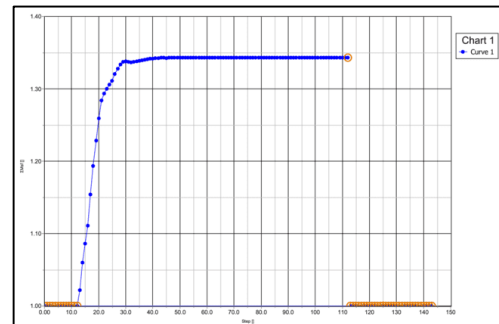
3.2 Perhitungan angka keamanan (FK)

Setelah melakukan pengujian sifat fisik dan mekanis tanah dari sampel yang diambil di area Jalan JLS, Kerangan, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan, variabel-variabel dari hasil pengujian tersebut digunakan untuk pemodelan menggunakan perangkat lunak *software PLAXIS*. Tujuan pemodelan ini adalah untuk mengukur deformasi tanah dan angka keamanan lereng dengan variasi kemiringan 20°, 40°, dan 60° pada dua kondisi muka air tanah, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Dan didapatkan hasil berupa angka keamanan tanah. Berikut adalah salah satu contoh hasil dari *software PLAXIS*:



Gambar 9. Simulasi Model Lereng 60° Musim Kemarau

Pemodelan menghasilkan nilai deformasi dan faktor keamanan (FK) untuk setiap kondisi lereng dan musim seperti pada Gambar 9 dan Gambar 10. Hasil menunjukkan bahwa faktor keamanan tanah lebih tinggi pada lereng yang lebih landai, dan menurun dengan bertambahnya kemiringan lereng.



Gambar 10. Angka Keamanan (FK) Lereng 60° Musim Kemarau

Faktor keamanan juga lebih tinggi pada musim kemarau dibandingkan dengan musim hujan, karena tanah pada musim kemarau memiliki kekuatan yang lebih besar akibat kandungan air yang lebih rendah. Berikut adalah data dari hasil pemodelan dengan menggunakan *software PLAXIS*:

Tabel 7. Hasil Pemodelan Metode Elemen Hingga

Lereng	Musim	Nilai γ_{dry} (kN/m ³)	Nilai γ_{wet} (kN/m ³)	Nilai γ_s (kN/m ³)	FK
20°	Hujan	12.65	17.58	0,4	4.599
	Kemarau	11.91	14.85	0,3	5.39
40°	Hujan	12.65	17.58	0,4	2.015
	Kemarau	11.91	14.85	0,3	2.346
60°	Hujan	12.65	17.58	0,4	1.181
	Kemarau	11.91	14.85	0,3	1.343

Dari pemodelan ini dengan hasil data seperti Tabel 7, dapat disimpulkan bahwa lereng dengan kemiringan yang lebih curam memiliki risiko keruntuhan yang lebih besar, terutama pada musim hujan, di mana kadar air tanah yang tinggi mengurangi kekuatan tanah secara signifikan. Serta pemodelan lereng berdasarkan pada data tanah yang ada dengan kemiringan lereng 20°, 40°, dan 60° dinyatakan aman.

3.3 Hasil parameter-parameter tanah

Hasil-hasil uji sifat fisik dan mekanik diperlihatkan pada Tabel 8 dan 9. Tabel 10 menunjukkan hasil simulasi menggunakan *software PLAXIS* untuk menentukan besarnya faktor keamanan (FK).

Tabel 8. Sifat Fisik Tanah

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1	Berat isi basah (γ_t)	kN/m ³	17,15
2	Berat isi kering (γ_d)	kN/m ³	12,20
3	Specific gravity (G_s)	-	2,648
4	Batas cair (LL)	%	68,47
5	Batas plastis (PL)	%	32,55
6	Indeks plastisitas (PI)	%	35,92
7	Angka pori (e)	-	0,998
8	Persentase lempung, < 0,005 mm	%	41,12
9	Persentase lanau, 0,005 – 0,075 mm	%	38,91

No.	Parameter	Satuan	Nilai
10	Persentase pasir, 0,075 – 4,75 mm	%	19,97
11	Klasifikasi tanah USCS	-	CH (Clayey Soil)
12	Klasifikasi tanah AASHTO	-	A-7-5 (Clayey Soil)

Tabel 9. Sifat Mekanis Tanah

No.	Parameter	Satuan	Nilai
1	Kohesi (c)	kg/cm ²	0,33
2	Sudut geser dalam (ϕ)	°	21,506
3	Kadar air optimum (OMC)	%	33,95
4	Berat isi kering maksimum (γ_{dmax})	kg/m ³	1,339

Tabel 10. Angka Keamanan Tanah

Kemiringan lereng	Musim	FK
20°	Hujan	4,599
	Kemarau	5,390
40°	Hujan	2,015
	Kemarau	2,346
60°	Hujan	1,181
	Kemarau	1,343

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian sifat fisik tanah, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah di lokasi tersebut memiliki karakteristik sebagai tanah ekspansif, ditandai dengan nilai batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) yang tinggi, serta kandungan partikel halus yang signifikan. Jenis tanah lokasi studi berdasarkan nilai aktivitas (A), maka dapat dikategorikan sebagai tanah ekspansif dengan batas-batas konsistensi umumnya sering terjadi pada lapisan lempung dan/ atau terkomposisi dengan lanau berplastisitas tinggi. Plastisitas tinggi mengakibatkan tekanan ke atas (*uplift pressure*) di lokasi studi, sehingga badan jalan menjadi rusak. Penataan drainase sangat diperlukan demi menghindari lapisan tanah ekspansif dari proses infiltrasi selama musim hujan.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa nilai angka keamanan (FK) bervariasi tergantung pada kemiringan lereng dan juga kadar air tanah atau pengaruh musim. Dengan menggunakan metode elemen hingga lereng dengan kemiringan 20°, 40°, dan 60° masih aman dan memenuhi nilai angka keamanan yang disyaratkan.

Terdapat beberapa langkah yang dapat dilakukan untuk meningkatkan keakuratan dan efektivitas analisis. Peningkatan jumlah sampel tanah dalam pengujian laboratorium diperlukan agar data yang diperoleh lebih akurat. Selain itu, penggunaan sampel tanah tidak terganggu (undisturbed) disarankan untuk memperoleh hasil yang lebih representatif terhadap kondisi di lapangan. Akurasi pemodelan dalam perangkat lunak *software PLAXIS* juga dapat ditingkatkan dengan menambahkan data dari pengujian lainnya, seperti pengujian konsolidasi. Untuk mengatasi perubahan

volume tanah, diperlukan sistem drainase yang memadai serta penguatan struktural yang sesuai. Dengan menerapkan langkah-langkah ini, diharapkan pengelolaan tanah ekspansif dapat dilakukan secara optimal guna meningkatkan keamanan dan keberlanjutan infrastruktur di wilayah tersebut.

Perubahan dari musim hujan ke kemarau dan sebaliknya, akan menimbulkan siklus basah-kering yang mengakibatkan adanya bagian yang mengalami saat-saat kering di dekat permukaan dan terjadinya retakan akibat proses pembasahan dan/ atau pengeringan. Untuk pertimbangan desain, besarnya pengembangan yang dapat ditolerir sesuai jenis konstruksi perkerasan perlu diperkirakan. Perlu diketahui pula batasan perbedaan penurunan konstruksi perkerasan yang diizinkan.

Daftar Rujukan

- [1] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika tanah I*, 3rd ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2002.
- [2] United States Geological Survey (USGS), "What is Soil?"
- [3] T. H. Al-Yaqoub, J. Parol, and D. Znidarcic, "Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil," *Appl Clay Sci*, vol. 137, pp. 22–29, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.CLAY.2016.11.018.
- [4] T. Daniel, Indarto, and S. R.A.A., "The Effects of Water Content Variation on Adhesion Factor of Pile Foundation in Expansive Soil," *Civil Engineering Dimension*, vol. 15, no. 2, Sep. 2013, doi: 10.9744/ced.15.2.114-119.
- [5] "American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)," 1981
- [6] American Society of Civil Engineers (ASCE), "Soil Mechanics Overview."
- [7] L. D. Jones and I. Jefferson, "Expansive soils. ICE Manual of Geotechnical Engineering: Second Edition, 1, 447–477," pp. 447–477, 2012.
- [8] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. 1943.
- [9] J. E. Bowles, *Foundation analysis and design*. McGraw-Hill, 1996.
- [10] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*. 2010.
- [11] ASTM International, "ASTM D4318-17: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils," West Conshohocken, 2017.
- [12] ASTM International, "Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hidrometer) Analysis, ASTM D7928-21," West Conshohocken, 2021.
- [13] ASTM International, "D2487 - 17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)," 2017 doi: 10.1520/D2487-17.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes," 1991
- [15] Skempton, "International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. The Colloidal 'Activity' of Clays L'Activité colloïdale des argiles," 1953, [Online]. Available: <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [16] H. B. Seed, R. J. Woodward, and R. Lundgren, "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, 88, 53-87," 1962.
- [17] ASTM International, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM D698-21," West Conshohocken, 2021.
- [18] ASTM International, "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, ASTM D2850-21," West Conshohocken, 2021.