



Analisis Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng STA 62+450 S/D 62+825 Pada Proyek Jalan Tol Seksi Sp. Indralaya – Prabumulih Dengan Software Geo Studio

T. Oktaliyani^{1*}, R. A. A. Soemitro², T. R. Satrya³

^{1*23}Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumian, Institut Teknologi
Sepuluh Nopember, Surabaya.

Email: ^{1*} tiara.oktaliyani@hutamakarya.com, ² soemitroaa@gmail.com, ³ trendysatrya@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 12-12-2024
Artikel revisi : 20-12-2024
Artikel diterima : 31-12-2024

Keywords :

hydroseeding, Slope, Sp. Indralaya, Prabumulih, GEO STUDIO, Rain Infiltration, Retaining Wall

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

T. Oktaliyani, R. A. A. Soemitro, dan T. R. Satrya "Analisis Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng STA 62+450 S/D 62+825 Pada Proyek Jalan Tol Seksi Sp. Indralaya-Prabumulih Dengan Software Geo Studio" *Jurmateks*, vol.7, no.2, pp. 129 - 144, 2024, doi: 10.30737/jurmateks.v7i2.6561

ABSTRACT

The construction of the Indralaya-Muara Enim Interchange Toll Road, especially the Indralaya-Prabumulih Interchange Section, was hampered by landslides after excavation was carried out between STA 62+450 to 62+825. The combination of steep slopes and rain infiltration weakened the soil structure, increasing the risk of landslides. This research aims to analyze the effect of rainwater infiltration on slope stability on the Sp Section Toll Road Project. Indralaya-Prabumulih. The research methodology used was to analyze landslide slope areas using the Slope/W and Seep/W programs from Geo Studio. This study evaluated different excavation heights and an initial excavation slope of 1:3. The focus is on calculating the safety factor (SF) at varying rain durations (1 hour, 3 hours, and 5 hours), with SF values below 1.5 indicating instability. The Safety Factor (SF) value of the existing soil before excavation was 1.58, but after 1 hour of rain, the SF decreased to 1.33 (15.66% decrease). After 3 hours, SF dropped to 1.13 (28.34% decrease), and reached 1.10 (30.24% decrease) after 5 hours. Strengthening slopes using the Hydroseeding method increases SF to 1.83, while the use of Retaining Wall increases SF more significantly to 2.54. This research reveals the impact of rain infiltration on soil stability and proves the effectiveness of slope strengthening methods. These results are an important basis for planning effective landslide mitigation on toll road excavations.

1. Pendahuluan

Untuk percepatan pelaksanaan pembangunan jalan tol di Sumatera, Pemerintah menugaskan pengusahaan jalan tol di Sumatera kepada PT Hutama Karya (Persero) [1]. Jalan Tol Simpang Indralaya-Muara Enim Seksi Simpang Indralaya - Prabumulih, bagian dari Jalan Tol Trans Sumatera, menjadi bagian penting dalam menghubungkan Kabupaten Ogan Ilir

dengan Prabumulih dan Muara Enim. Pembangunan ini memiliki peran strategis dalam mendukung pertumbuhan ekonomi daerah dengan mempercepat arus barang dan jasa.

Jalan tol ini memiliki panjang 64,5 km dan terdiri dari 6 zona. Pada pelaksanaan konstruksi, ditemukan kelongsoran pada galian lereng pada STA 62+450 hingga STA 62+825 setelah dilakukan galian. Mekanisme kelongsoran tersebut diduga sebagai jenis rayapan (*creep*) atau longsor permukaan. *Creep* yang terjadi merupakan proses akibat pelapukan (*Weathering*) yang terjadi dalam jangka waktu yang relatif lama tanah tersebut terekspose. Sehingga kuat geser dan besarnya deformasi sangat tergantung dari waktu sejak mulai terekspose, tingkat pelapukan dan *Stress Relieve* yang terjadi [2]. Jenis tanah pada lokasi ini dikategorikan berupa tanah *Clay Shale* yang mana mudah mengalami keruntuhan atau mudah mengalami perubahan dari batuan yang semula nampak keras menjadi batuan yang lemah. Proses perubahan ini berlangsung dalam beberapa bulan bagi *clay shale* yang telah tersingkap[3]. Selain itu, *Clay Shale* mudah mengalami penurunan durabilitas dari waktu ke waktu apabila ada kontak langsung dengan udara dan air. Daerah ini memiliki curah hujan yang cukup tinggi sehingga akan menyebabkan lapisan lempung ini bereaksi dengan air[4].

Kawasan ini terdiri dari formasi Muara Enim yang mencakup batu pasir, batu lempung, dan batu pasir tufa. Pada STA 62+450 hingga STA 62+825, ditemukan lapisan serpih lempung yang terlapuk dan mudah terdegradasi, yang semakin lemah setelah terpapar hujan dan udara. Hasil bor log menunjukkan kedalaman air tanah yang berada jauh di bawah permukaan. Penyelidikan lebih lanjut dilakukan dengan pengambilan data *sondir*, yang menunjukkan tanah pada kedalaman 5-10 m berupa campuran lanau berpasir hingga lanau berlempung. Selain faktor tanah, curah hujan yang tinggi menjadi faktor utama dalam terjadinya kelongsoran.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan merupakan proses rembesan *multifase* di mana air mengalir di tanah tak jenuh dan secara bertahap mengeluarkan gas pori. Gas pori dapat menghambat infiltrasi air hujan, dan laju infiltrasi air hujan meningkat secara signifikan ketika tanah jenuh [5]. Di satu sisi, infiltrasi air hujan menyebabkan peningkatan tekanan air pori tanah tak jenuh dan penurunan tegangan efektif, yang pada gilirannya menyebabkan penurunan kekuatan geser tanah [6], [7], [8];, [9], [10]. Di sisi lain, infiltrasi air hujan menjenuhkan tanah lereng, yang menyebabkan hilangnya daya serap matriks tanah, peningkatan permeabilitas, dan penurunan faktor keamanan lereng yang signifikan [5], [11], [12], [7], [10]. Selain itu, infiltrasi air hujan yang berkepanjangan juga meningkatkan kadar air, gaya geser, dan gaya infiltrasi, yang menyebabkan intensifikasi deformasi tanah, yang tidak kondusif bagi stabilitas lereng [13], [14], [10]. Banyak studi telah membahas pengaruh infiltrasi hujan pada stabilitas lereng, sebagian besar fokus pada parameter umum tanpa

memodelkan efek pada kondisi spesifik proyek infrastruktur seperti jalan tol. Belum banyak penelitian yang secara khusus mengkaji dampak infiltrasi hujan terhadap stabilitas lereng dengan karakteristik tanah serpih lempung pada proyek jalan tol di wilayah Sumatera.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh infiltrasi air hujan terhadap stabilitas lereng pada Proyek Jalan Tol Seksi Sp. Indralaya–Prabumulih. Melalui penelitian ini, akan didapatkan pemahaman mendalam mengenai perubahan faktor keamanan lereng akibat infiltrasi hujan, termasuk mekanisme penjenjutan tanah, penurunan kohesi, dan kuat geser tanah pada berbagai durasi hujan. Dengan hasil analisis ini, dapat ditentukan desain mitigasi yang tepat, seperti geometri lereng yang aman, serta metode perkuatan yang efektif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam perencanaan dan pelaksanaan mitigasi tanah longsor pada proyek infrastruktur, khususnya jalan tol, untuk memastikan stabilitas lereng yang lebih baik dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan perangkat lunak *Geostudio* untuk menganalisis stabilitas lereng. *Seep/w* digunakan untuk analisa pergerakan air menuju ke tanah, infiltrasi hujan dan tekanan air dalam tanah. *Slope/w* digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng. Sebelum melakukan analisa, dilakukan perhitungan intensitas curah hujan untuk durasi hujan 1 jam, 3 jam dan 5 jam. Selain itu juga dilakukan penentuan parameter tanah setelah digali serta *terekspos* oleh udara dan air. Parameter tanah kohesi dan kuat geser yang digunakan adalah yang menghasilkan bidang keruntuhan lereng yang paling mendekati bidang keruntuhan yang diinterpretasikan dari indikator lapangan[22]. Dari pemodelan dapat dijelaskan bagaimana proses infiltrasi terhadap longsor. Selanjutnya dilakukan pemodelan nilai stabilitas lereng berdasar tinggi muka air tanah [21].

2.1 Pengumpulan Data

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Proyek Jalan Tol Ruas Sp. Indralaya – Muara Enim Seksi Sp. Indralaya – Prabumulih PT Hutama Karya (Persero). Adapun data yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

1. Gambar DED (Detail Engineering Design) atau Rencana Teknik Akhir (RTA) digunakan untuk pemodelan berdasarkan kondisi eksisting. Sedangkan gambar Shop Drawing berfungsi sebagai acuan dalam menganalisis alternatif perkuatan lereng.
2. Data curah hujan yang digunakan diperoleh dari laporan perencanaan awal proyek dan bersumber dari Balai Pengelola Sumber Daya Air Kota Prabumulih. Selain itu, data laporan *monitoring* cuaca diambil dari catatan cuaca harian pada masa pelaksanaan proyek,

khususnya saat terjadinya longsor dan curah hujan tertinggi pada bulan Maret 2022. Perhitungan curah hujan rancangan melibatkan analisis statistik, pemilihan distribusi, dan uji kesesuaian. Distribusi Log-Pearson III dan *Gumbel* digunakan untuk analisis frekuensi. Intensitas hujan dihitung dengan persamaan *Mononobe*, mempertimbangkan karakteristik area tangkapan.

$$I_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Perhitungan water flux menggunakan rumus:

$$J = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Rumus ini berfungsi untuk menghitung laju aliran air yang melewati suatu area tertentu per satuan waktu. Konsep ini digunakan untuk memahami pola dan dampak aliran air. Dalam perencanaan jalan tol, kala ulang banjir 50 tahun sesuai dengan umur konsesi Jalan tol, digunakan untuk desain infrastruktur seperti drainase dan jembatan. Pemodelan hujan menggunakan data curah hujan harian maksimum dari stasiun Prabumulih, dengan durasi hujan 1, 3, dan 5 jam.

- Hasil Penyelidikan Tanah Bor log dan *Sondir*. Hasil penyelidikan berupa uji *standard penetration test* (SPT) pada kondisi sebelum longsor dan uji *sondir* setelah longsor. *Sample* tanah yang diperoleh dari penyelidikan bor log kemudian diuji di laboratorium untuk menentukan sifat-sifat tanah dan mendapatkan parameter yang dibutuhkan untuk analisis dengan *software*. Berdasarkan data bor log dan *sondir*, stratigrafi tanah disusun untuk mengelompokkan jenis dan konsistensi tanah. Stratigrafi ini membantu memahami struktur tanah dan merencanakan proyek dengan lebih baik. Penulis juga melakukan klasifikasi tanah dengan tabel USCS (*Unified Soil Classification System*) yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan jenis tanah berdasarkan sifat-sifat fisik yang didapat hasil uji laboratorium tanah. Sedangkan parameter *Hydroseeding* mengacu pada penelitian sebelumnya [23].

Tabel 1. Parameter Tanah Eksisting

Material	Depth	Description	Consistency	USCS Clasification	Material Model	Density y	Penyelidikan Lapangan	
						(kN/m ³)	c (Kn/m ²)	Φ (deg)
Layer 1	0-3	Sandy Clayey Silt	Medium to Stiff	CL	Mohr-coloumb	16	25	20
Layer 2	4-22	Sandy Clayey Silt	Very Stiff	CL	Mohr-coloumb	15	100	30
Layer 3	22-40	Sandy Clayey Silt	Hard, Dense	CL	Mohr-coloumb	17,5	200	40
Hydroceeding					Mohr-coloumb	21	10	34
Retaining Wall					High Strength	24	-	-
Cerucuk Gelam					High Strength	0,5	-	-

Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Tabel 1 menunjukkan karakteristik stratigrafi tanah di lokasi penelitian yang terdiri

Analisis Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng STA 62+450 S/D 62+825 Pada Proyek jalan Tol Seksi Sp. Indralaya-Prabumulih Dengan *Software Geo Studio*

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6561>



dari tiga lapisan utama dengan variasi konsistensi, kohesi, dan sudut geser dalam. Lapisan pertama (0–3 meter) dengan konsistensi "Medium to Stiff" memiliki kohesi rendah (25 kN/m^2) dan sudut geser dalam (ϕ) sebesar 20° , menjadikannya lapisan paling rentan terhadap kelongsoran akibat infiltrasi hujan. Lapisan kedua (4–22 meter) memiliki konsistensi "Very Stiff," kohesi lebih tinggi (100 kN/m^2), dan sudut geser 30° , menunjukkan ketahanan lebih baik terhadap deformasi, meskipun tetap terpengaruh tekanan air pori. Lapisan ketiga (22–40 meter) dengan konsistensi "Hard/Dense" memiliki kohesi tertinggi (200 kN/m^2) dan sudut geser dalam 40° , berfungsi sebagai lapisan penopang stabilitas lereng. Temuan ini menegaskan bahwa lapisan atas tanah lebih rentan terhadap infiltrasi air hujan, yang secara signifikan memengaruhi stabilitas lereng,

2.2 Pemodelan dan Analisa Infiltrasi Hujan

Untuk analisis data hujan, digunakan data hujan rata-rata harian dari Balai Pengelola Sumber Daya Air Kota Prabumulih. Penelitian ini mencakup analisis distribusi frekuensi (Normal, Log Normal, *Gumbel*, dan Log Person III), uji kesesuaian distribusi menggunakan metode *Smirnov Kolmogorov*, serta perhitungan intensitas hujan dengan persamaan *Mononobe*. Untuk analisis infiltrasi hujan menggunakan *software SEEP/W*, perlu dimasukkan parameter data hujan yang menggambarkan kondisi curah hujan selama simulasi. Parameter yang harus di *input* antara lain:

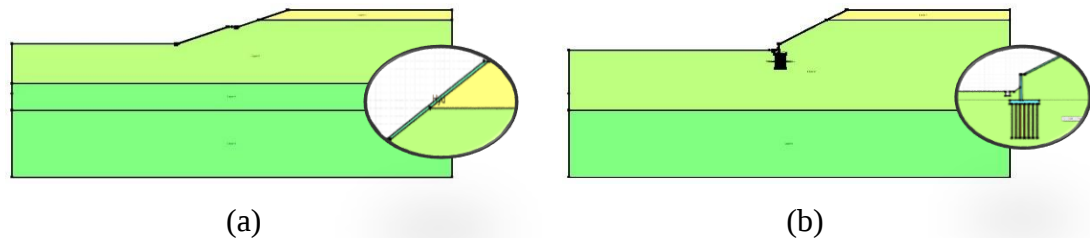
1. Grafik *Hydraulic Boundary Function* dengan nilai intensitas hujan periode 50 tahun untuk durasi hujan 1 jam, 3 jam, dan 5 jam,
2. Grafik *Volumetric Water Content* dengan parameter a (kPa), n , kompresibilitas ($/\text{kPa}$), *Saturated Water Content*, dan *Residual Water Content*,
3. Grafik *Hydraulic Conductivity* dengan nilai permeabilitas (m/detik).

Metode analisis infiltrasi hujan mengacu pada penelitian sebelumnya [21]. Rembesan dianalisis menggunakan *SEEP/W* untuk menentukan perubahan tekanan air pori akibat infiltrasi, kemudian diekspor ke *SLOPE/W* untuk menghitung faktor keamanan. Analisis dilakukan pada lereng eksisting dan setelah digali dengan parameter tanah yang direduksi.

2.3 Pemodelan dan Analisa Lereng

Berdasarkan data bor log klasifikasi tanah dapat dilakukan berdasarkan nilai N-SPT, sedangkan berdasarkan data *sondir* klasifikasi tanah dapat dilakukan berdasarkan nilai tahanan konus (q_c) dan friksi (f_R). beberapa parameter tanah yang dibutuhkan untuk analisa pada program *software Slope/w* dalam *GeoStudio*, yaitu nilai *density*, γ (kN/m^3), kohesi, c (kN/m^2), sudut geser, ϕ ($^\circ$). Hasil dari analisis pemodelan dengan memasukkan parameter tanah setelah

digali ini harus menunjukkan $SF \leq 1.5$. Hal tersebut dapat menjadi acuan gambaran bidang gelincir pada kondisi eksisting lapangan yang longsor. Selanjutnya dilakukan pengecekan ulang pemodelan dengan berbagai variasi geometri dan perkuatan lereng. Hal tersebut dilakukan sampai mencapai kondisi $SF \geq 1.5$. Adapun usulan pemodelan variasi lereng, yaitu pemodelan lereng dengan perkuatan *hydroseeding* dan *retaining wall*.



Sumber: Data Penulis (2024).

Gambar 1. (a) Pemodelan *Hydroseeding* (b) Pemodelan *Retaining Wall*.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Analisis Data Hujan

Dalam analisis data hujan, didapatkan hasil yang mencakup *water flux* serta hubungan antara Volumetric Water Content (VWC) dan Hydraulic Conductivity (K) untuk memahami dampak hujan terhadap rembesan air tanah dan stabilitas lereng.

a. *Water Flux*

Hasil analisa *water flux* dihitung untuk berbagai durasi hujan dengan menggunakan asumsi luas area sebesar 1 m². Analisis ini bertujuan untuk memahami aliran air hujan yang meresap ke dalam tanah selama periode tertentu. Intensitas hujan yang digunakan meliputi tiga variasi durasi, yaitu 1 jam, 3 jam, dan 5 jam.

Tabel 2. Nilai *Water Flux* Setiap Variasi Hujan

Intensitas hujan (mm/jam)	1 jam 8,38	Variasi 3 Jam 15,94	5 Jam 22,73
Waktu (hari)		WaterFlux (m3/sec/m3)	
0	0,000021407	0,0000102914	0,00000732109
0,041666667	0	0,0000102914	0,00000732109
0,083333333	0	0,0000102914	0,00000732109
0,125	0	0	0,00000732109
0,166666667	0	0	0,00000732109
0,208333333	0	0	0
1	0	0	0

Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Hasil perhitungan *water flux* dimasukkan kedalam parameter *Hydraulic Boundary Function*, langkah untuk dijadikan beban durasi hujan dengan *Boundary Condition* pada permukaan lereng pada program *seep/w*. Proses ini melibatkan pengaturan parameter terkait intensitas hujan dan durasi hujan.

b. *Volumetric water content (VWC)* dan *hydraulic conductivity (K)*

Analisis Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng STA 62+450 S/D 62+825 Pada Proyek jalan Tol Seksi Sp. Indralaya-Prabumulih Dengan *Software Geo Studio*

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6561>

Dalam pemodelan rembesan air tanah pada lereng diperlukan *Volumetric water content* (VWC) dan *hydraulic conductivity* (K) menganalisis pergerakan air akibat hujan dan perubahan muka air tanah. Korelasi antara VWC dan K dilakukan dengan metode *Van Genuchten*. Hasil analisis diuraikan pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Nilai *Volumetric water content* (VWC) dan *hydraulic conductivity* (K)

Material	Depth	Description	Consistency	USCS Classification	Types	Volumetric Water Content					Hyd. conductivity	
						Density γ_a (kPa)	n	Compressibility (kPa)	Sat. WC	Res WC	Types	Permeability k (m/sec)
Layer 1	0-3	Sandy Clayey Silt	Medium to Stiff	CL	Van Genuchten Function	10	1,5	1,00E-05	0,42	0,05	Hyd K data	6.30E-07
Layer 2	4-22	Sandy Clayey Silt	Very Stiff	CL	Van Genuchten Function	100	1,3	1.00E-0,5	0,36	0,05	Hyd K data	2.56E-07
Layer 3	22-40	Sandy Clayey Silt	Hard, Dense	CL	Van Genuchten Function	10	1,15	1.00E-0,5	0,34	0,05	Hyd K data	1.79E-07
Hydroseeding					Van Genuchten Function	4,31	2	1.00E-0,5	0,15	0,05	Hyd K data	2.60E-08
Retaining Wall Cerucuk Gelam					none						-	-

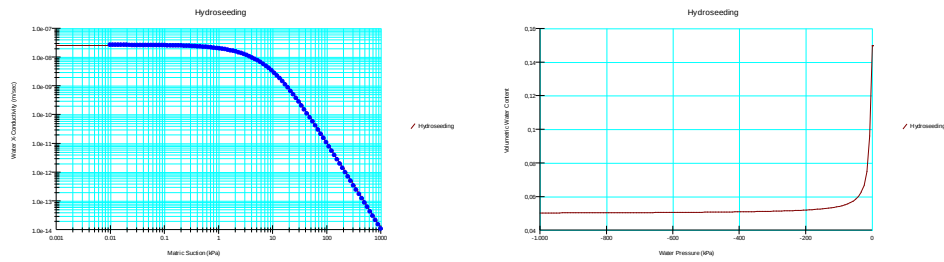
Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Tabel 3 menunjukkan nilai *Volumetric Water Content* (VWC) dan *hydraulic conductivity* (K) untuk berbagai lapisan tanah di lokasi penelitian, menggunakan pendekatan Van Genuchten. Lapisan 1 (0–3 meter) memiliki nilai saturasi air (Sat. WC) sebesar 0.42 dan *permeability* 6.30E-07 m/s, menunjukkan kemampuan tanah untuk menyerap air dengan cukup tinggi. Lapisan 2 (4–22 meter) memiliki Sat. WC lebih rendah, yaitu 0.36 dengan *permeability* 2.56E-07 m/s, mencerminkan resistensi terhadap infiltrasi yang lebih besar. Lapisan 3 (22–40 meter) dengan Sat. WC 0.34 dan *permeability* 1.79E-07 m/s memiliki karakteristik yang lebih padat dan sulit ditembus air.

Adapun nilai parameter untuk perkuatan vegetasi dengan metode *hydroseeding* pada bagian top soil mengacu pada hasil penelitian sebelumnya [23] dimana nilai a (kPa) sebesar 4,31 kPa dan n sebesar 2. Sementara Pendekatan parameter nilai a dilakukan pendekatan nilai dari penelitian sebelumnya [24], nilai n diambil dari penelitian sebelumnya [25]; [26]. Pendekatan parameter *saturated water content* dari penelitian sebelumnya [25]; [26] dan *residual water content* diambil dari penelitian sebelumnya [27]. Pendekatan nilai kompresibilitas diambil dari hasil penelitian sebelumnya.

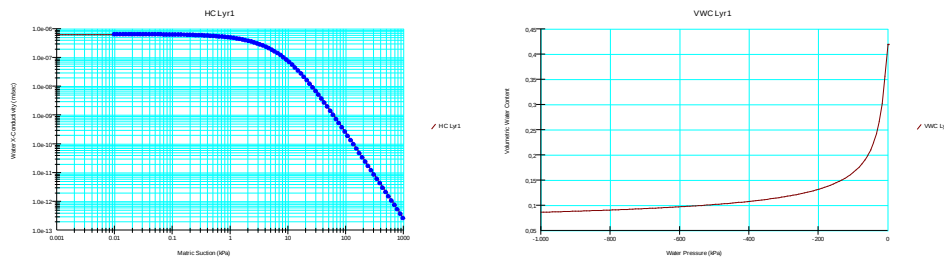
c. Arah Pergerakan Air

Setelah data-data di atas dimasukkan, diperoleh grafik yang menunjukkan hubungan antara *volumetric water content* dengan nilai *matric suction* serta grafik yang menggambarkan hubungan antara *hydraulic conductivity* dengan nilai *matric suction* untuk setiap lapisan tanah.



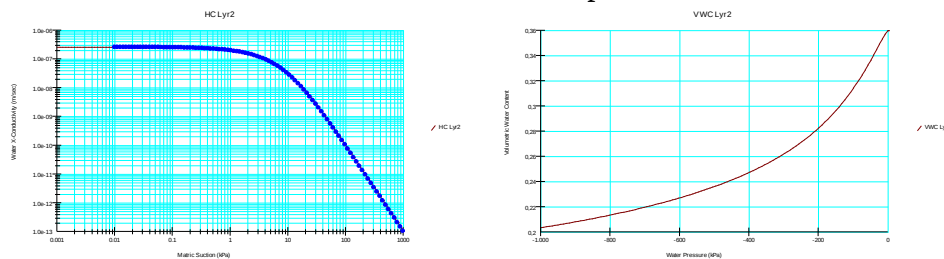
Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 2. Grafik VWC dan HC Lapisan Top Soil Hydroseeding



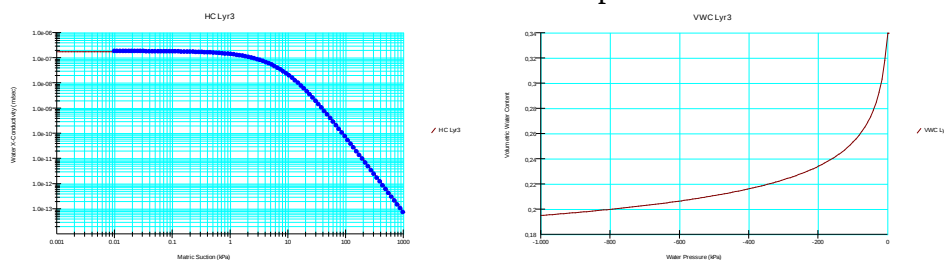
Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 3. Grafik VWC dan HC Lapisan Tanah Pertama



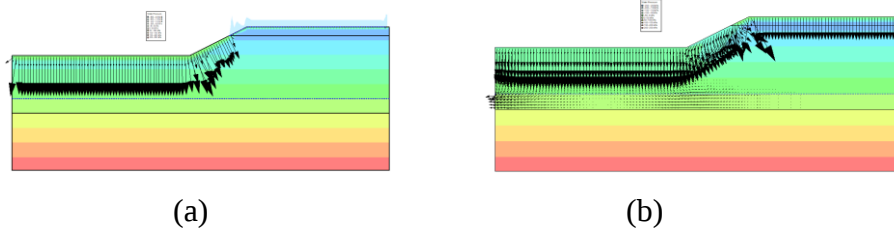
Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 4. Grafik VWC dan HC Lapisan Tanah Kedua



Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 5. Grafik VWC dan HC Lapisan Tanah Ketiga



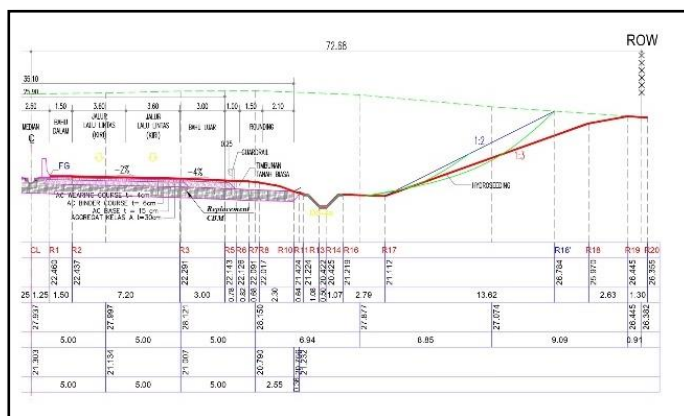
Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 6. (a) Arah Pergerakan Air Menuju Tanah Pada Durasi Hujan 1 Jam (b) Arah Pergerakan Air Menuju Tanah Pada Durasi Hujan 24 Jam

Dari hasil analisa *Seep/w* pada di atas arah pergerakan air menuju ke tanah pada durasi hujan 1 jam menunjukkan bahwa air hujan mengalir terlebih dahulu di permukaan sebelum akhirnya meresap ke dalam tanah melalui pori-pori tanah kemudian bergerak secara vertikal maupun horizontal menuju permukaan air tanah. Hal ini juga ditunjukkan munculnya garis muka air pada lereng pada saat durasi hujan 1 jam, masih ada genangan air di permukaan tanah dan setelah 24 jam, genangan air dipermukaan sudah meresap ke tanah. Hal ini juga terjadi pada pengamatan durasi hujan 3 jam dan 5 jam.

3.2 Karakteristik Tanah Setelah Digali

Setelah pembebasan lahan di STA 62+450 hingga 62+825 pada tahun 2021 dengan parameter tanah eksisting pada Tabel 1, keruntuhan lereng mulai terlihat akibat eksposur terhadap hujan dan udara, terutama pada puncak musim hujan Maret 2022. Mekanisme kelongsoran berupa rayapan (*creep*) terjadi karena pelapukan tanah *Clay Shale*. Tanah Clay Shale diketahui memiliki karakteristik mudah lapuk, di mana kekuatannya menurun signifikan akibat kontak dengan air dan udara. Proses pelapukan ini mempercepat penurunan kekuatan geser tanah, terutama ketika lereng telah diekspos selama waktu yang lama. Berdasarkan pengamatan dan evaluasi di lapangan, lereng di lokasi ini diperkirakan akan mencapai kemiringan akhir sebesar 1V : 3H untuk menyesuaikan kestabilan alami.



Sumber: Proyek Jalan Tol Simpang Indralaya - Prabumulih (2021).

Gambar 7. Prediksi Keruntuhan Lereng Berdasarkan Pengamatan di Lapangan

Gambar 7 menunjukkan prediksi keruntuhan lereng yang didasarkan pada pengamatan langsung di lapangan. Prediksi ini digunakan sebagai acuan dalam analisis stabilitas lereng dan rencana mitigasi untuk mencegah longsor lebih lanjut. Kekuatan geser tanah *Clay shale* mengalami penurunan yang signifikan akibat pelapukan, terutama ketika tanah terekspos terhadap udara dan air, hingga mencapai kondisi kekuatan lunak penuh saat direndam[28]. Penelitian terhadap tanah Clay Shale pada lereng yang telah digali menunjukkan

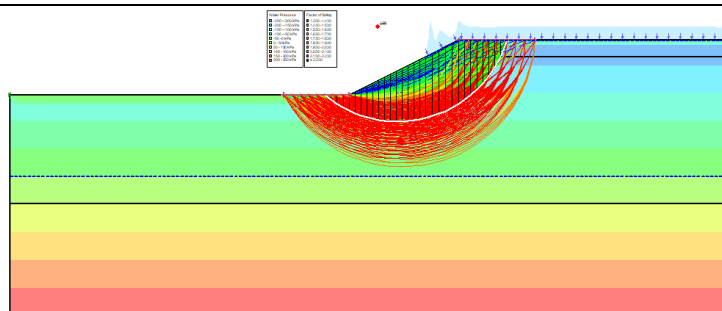
hasil uji triaksial menggunakan sampel berdiameter 38 mm menghasilkan kekuatan puncak dengan kohesi (c') sebesar 14 kN/m² dan sudut geser (ϕ) sebesar 20°[29]. Pada pengujian lain dengan sampel yang lebih besar, yaitu berdiameter 250 mm, hasil menunjukkan nilai kohesi lebih kecil, yaitu 7 kN/m², dengan sudut geser tetap sebesar 20°. Penurunan nilai kohesi dan sudut geser ini menjadi faktor utama yang memengaruhi kestabilan lereng di lokasi penelitian [30]. Hasil uji laboratorium saat kondisi lereng sudah digali dan terekspose oleh udara dan hujan tersebut belum ada. Kemiringan lereng di KM 97+500 Jalan Tol Cipularang diduga disebabkan oleh penurunan kekuatan lapisan *clay shale* akibat pekerjaan pengupasan [31]. Sayangnya, data laboratorium mengenai serpih lempung yang terekspose belum tersedia.

Parameter kuat geser *clay shale* pada kondisi keruntuhan dievaluasi dengan menghitung kembali berdasarkan prediksi kondisi keruntuhan yang diperoleh dari pemantauan indikator kemiringan. Profil tanah dan parameter kekuatan geser lapisan lainnya disusun berdasarkan gambar *as-built* dan hasil *coring* setelah keruntuhan lereng. Studi parametrik dilakukan melalui analisis stabilitas lereng untuk menentukan beberapa parameter prediksi kuat geser lempung serpih. Parameter kuat geser lempung serpih yang digunakan adalah yang menghasilkan bidang keruntuhan lereng yang paling mendekati bidang keruntuhan yang diinterpretasikan dari indikator lapangan. Keruntuhan lereng diindikasikan dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,0 [22]. Pada Penelitian ini juga belum tersedia hasil laboratorium tanah *clay shale* setelah terekspose, sehingga parameter kuat geser *clay shale* pada kondisi keruntuhan dievaluasi dengan melakukan perhitungan kembali berdasarkan nilai kuat geser dan kohesi berdasarkan grafik kuat geser tanah residual [2] [29], serta prediksi keruntuhan. Evaluasi dilakukan dengan bantuan program *software Geo Studio Seep/w* dan *Slope/w*.

Tabel 4. Perbandingan Parameter Tanah Eksisting dan Teresidu

Material	Depth	Description	Consistency	USCS Classification	Material Model	Density, γ (kN/m ³)	Penyelidikan Lapangan		Parameter Setelah Digali		Tereduksi	
							c (Kn/m ²)	ϕ (deg)	c (Kn/m ²)	ϕ (deg)	c (Kn/m ²)	ϕ (deg)
Layer 1	0-3	Sandy Clayey Silt	Medium to Stiff	CL	Mohr-Coulomb	16	25	20	15	10	40%	50%
Layer 2	4-22	Sandy Clayey Silt	Very Stiff	CL	Mohr-Coulomb	15	100	30	20	5	80%	83%
Layer 3	22-40	Sandy Clayey Silt	Hard, Dense	CL	Mohr-Coulomb	17.5	200	40	35	18		
Hydrocedding Retaining Wall					Mohr-Coulomb	21	10	34	10	34		
Cerucuk Gelam					High Strength	24	-	-	-	-		
					High Strength	0.5	-	-	-	-		

Sumber: Hasil Penelitian (2024).



Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 8. Hasil Bidang Runtuh Lereng Tanah Teresidu

Dari tabel dan gambar di atas, maka dapat dilihat bahwa keruntuhan lereng terjadi akibat nilai kohesi (c) dan kuat geser (ϕ) tereduksi. Pada lapisan 1 (layer 1) nilai kohesi tereduksi 40% dan kuat geser (ϕ) tereduksi 50%, sedangkan pada lapisan 2 (layer 2) nilai kohesi tereduksi 80% dan kuat geser (ϕ) tereduksi 83%. Lapisan 3 (layer 3) tidak direduksi, karena hasil pengamatan di lapangan, kelongsoran hanya terjadi pada ketinggian lereng 5 m sampai dengan 10 m.

3.3 Stabilitas Lereng

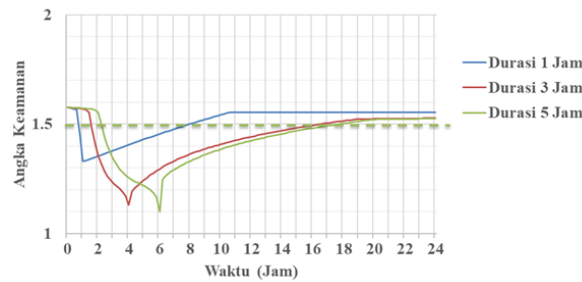
Data parameter tanah tereduksi dimasukkan ke dalam analisis untuk mengevaluasi pengaruh infiltrasi hujan terhadap stabilitas lereng. Parameter ini digunakan dalam simulasi untuk menghitung **Safety Factor (SF)** pada berbagai durasi hujan, yaitu 1 jam, 3 jam, dan 5 jam, serta kondisi setelah 24 jam. Hasil analisis ini memberikan gambaran tentang penurunan stabilitas lereng akibat infiltrasi hujan.

Tabel 5. *Safety Factor* Lereng Eksisting Tanah Teresidu

Model	Tinggi	Slope	Durasi (jam)	Waktu ke- (jam)	SF	Penurunan SF
SF Terhadap Durasi Hujan						
Eksisting	10	1:2	-	0	1.58	
Eksisting	10	1:2	1	1	1.33	15,66%
Eksisting	10	1:2	3	4	1.13	28,34%
Eksisting	10	1:2	5	6	1.10	30,24%
Eksisting	10	1:2	-	24	1/55	1,48%

Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa infiltrasi hujan secara signifikan menurunkan stabilitas lereng. Pada kondisi awal tanpa hujan, SF berada pada nilai 1,58, yang masih mendekati ambang batas kestabilan. Namun, setelah durasi hujan 1 jam, SF menurun menjadi 1,33 atau mengalami penurunan sebesar 15,66%. Penurunan semakin tajam pada durasi 3 jam dengan SF menjadi 1,13 (penurunan 28,34%) dan mencapai nilai terendah pada durasi 5 jam dengan SF sebesar 1,10 (penurunan 30,24%). Setelah 24 jam, SF sedikit meningkat menjadi 1,55, yang menunjukkan adanya pemulihan parsial, tetapi tetap di bawah kondisi awal.



Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 9. Grafik Perubahan SF Lereng Eksisting Tanah Teresidu Terhadap Durasi Hujan

Berdasarkan analisa lereng dengan pengaruh infiltrasi hujan menunjukkan nilai *Safety Factor* (SF) < 1,5. Hal ini dapat dibandingkan dengan hasil analisa pada kondisi eksisting dengan parameter tanah hasil penyelidikan tanah di lapangan, bahwa penyebab kelongsoran adalah karena tereduksinya nilai kohesi dan sudut geser setelah lereng digali serta terkespose oleh udara dan air.

3.4 Perkuatan Kestabilan Lereng

Untuk memperbaiki kelongsoran yang terjadi, dilakukan perbaikan lereng dengan melandaikan lereng serta menambah perkuatan *Hydroseeding* dan *Retaining Wall*. Langkah ini bertujuan untuk meningkatkan kembali nilai *Safety Factor* (SF) dan memastikan kestabilan lereng

Sesuai dengan kondisi kelongsoran alami di lapangan, lereng dirancang dengan kemiringan 1:3. Pemodelan melibatkan penambahan *borders* sebagai pemisah untuk lereng yang memiliki ketinggian di atas 5 sampai dengan 10 m. Perkuatan pertama dilakukan dengan metode *hydroseeding* , yaitu penanaman vegetasi pada lereng dengan ketebalan 50 cm. Variasi perkuatan kedua yaitu dengan menambahkan *Retaining Wall* pada kaki timbunan untuk menambahkan tekanan lateral tanah. Hasil analisis diuraikan sebagai berikut:

Tabel 6. *Safety Factor* Lereng dengan Perkuatan *Hydroseeding* dan *Retaining Wall*

Model	Tinggi	Slope	Durasi (jam)	Waktu ke- (jam)	SF	Penurunan SF	Peningkatan dari SF Eksisting Tanah Teresidu
SF Terhadap Durasi Hujan							
Hydroseeding	10	1:3	-	-	1.83		15.96%
Hydroseeding	10	1:3	1	2	1.74	4.85%	
Hydroseeding	10	1:3	3	4	1.49	18.52%	
Hydroseeding	10	1:3	5	6	1.25	31.64%	
Hydroseeding	10	1:3	-	24	1.81	0.93%	
SF Terhadap Durasi Hujan							
Retaining Wall	10	1:3	-	0	2.54		60.89%
Retaining Wall	10	1:3	1	1.2	2.05	19.20%	
Retaining Wall	10	1:3	3	4	1.64	35.36%	
Retaining Wall	10	1:3	5	6	1.42	44.03%	
Retaining Wall	10	1:3	-	24	2.42	4.80%	

Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Hasil menunjukkan bahwa metode Hydroseeding meningkatkan SF awal hingga 1,83, atau sebesar 15,96% dibandingkan kondisi tanah teresidu. Namun, SF mengalami penurunan bertahap setelah durasi hujan 1 jam menjadi 1,74 (penurunan 4,85%), durasi 3 jam menjadi 1,49 (penurunan 18,52%), dan durasi 5 jam menjadi 1,25 (penurunan 31,64%). Setelah 24 jam, SF kembali meningkat menjadi 1,81, menunjukkan pemulihan parsial pada stabilitas lereng.

Sementara itu, metode Retaining Wall memberikan hasil yang lebih signifikan. SF awal mencapai 2,54, atau meningkat 60,89% dibandingkan kondisi tanah teresidu. Meskipun terjadi penurunan SF setelah 1 jam hujan menjadi 2,05 (penurunan 19,20%), durasi 3 jam menjadi 1,64 (penurunan 35,36%), dan durasi 5 jam menjadi 1,42 (penurunan 44,03%), SF kembali meningkat menjadi 2,42 setelah 24 jam, menunjukkan efektivitas yang lebih besar dibandingkan dengan Hydroseeding.

Hasil ini menunjukkan bahwa Retaining Wall lebih efektif dalam meningkatkan dan menjaga kestabilan lereng dibandingkan Hydroseeding, terutama dalam kondisi hujan dengan durasi yang lebih lama. Namun, kombinasi kedua metode dapat menjadi solusi optimal untuk mencegah longsor pada lereng dengan risiko infiltrasi hujan yang tinggi.

4. Kesimpulan

Tanah longsor pada lereng hasil galian disebabkan oleh penurunan parameter kohesi dan kuat geser tanah akibat infiltrasi hujan. Pada lapisan pertama, kohesi tereduksi sebesar 40% menjadi 15 kN/m², dan kuat geser (ϕ) turun 50% menjadi 10°. Pada lapisan kedua, kohesi turun 80% menjadi 20 kN/m², sementara kuat geser turun 83% menjadi 5°. Lapisan ketiga tidak mengalami penurunan, karena longsor teramati hanya pada ketinggian lereng 5–10 meter. Pemodelan menunjukkan bahwa infiltrasi hujan selama 1 jam menghasilkan genangan di permukaan tanah, yang mulai meresap setelah 24 jam. Nilai Safety Factor (SF) tanah eksisting sebelum digali adalah 1,58, namun setelah 1 jam hujan, SF menurun menjadi 1,33 (penurunan 15,66%). Setelah 3 jam, SF turun menjadi 1,13 (penurunan 28,34%), dan mencapai 1,10 (penurunan 30,24%) setelah 5 jam. Perkuatan lereng dengan metode *Hydroseeding* meningkatkan SF menjadi 1,83, sedangkan penggunaan *Retaining Wall* meningkatkan SF lebih signifikan hingga 2,54. Penelitian ini mengungkapkan dampak infiltrasi hujan terhadap stabilitas tanah serta membuktikan efektivitas metode perkuatan lereng. Hasil ini menjadi landasan penting dalam perencanaan mitigasi tanah longsor pada galian jalan tol secara efektif.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sepuluh Nopember atas dukungan yang diberikan dalam mempermudah proses penyusunan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 42 Tahun 2024 Tentang Perubahan Ketiga Atas Peraturan Presiden Nomor 100 Tahun 2014 Tentang Percepatan Pembangunan Jalan Tol di Sumatera.
- [2] E. Gartung, "Excavation in Hard Clays of the Keuper Formation," *Proceeding of Symposium, Geotechnical Engineering Division*, Seattle, Washington, 1986.
- [3] R. Oktaviani, P. Raharjo, I. Sadisun, "Kajian Ketahanan Batuan Clay Shale Formasi Jatiluhur di Sentul City Jawa Barat (Study of Durability Clay Shale Jatiluhur Formation at Sentul City West Java)," *Promine Journal*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-32, 2018.
- [4] C. Moses, R. Williams, "Weathering and durability of the Goldsworthy Chalk Stones, South Downs, West Sussex, England," *Environ Geol*, Vol. 56, pp. 495–506, 2008.
- [5] H. Rahardjo, V. A. Santoso, E. C. Leong, Y. S. Ng, C. J. Hua, "Numerical analyses and monitoring performance of residual soil slopes," *Soils Found*, Vol. 51, No. 3, pp. 471–482, 2011.
- [6] B. D. Collins, D. Znidarcic, "Stability analyses of rainfall induced landslides. J. Geotech. Geoenviron," *Eng*, Vol. 130, No. 4, pp. 362–372, 2004.
- [7] Y. Kim, S. Jeong, J. Kim, "Coupled infiltration model of unsaturated porous media for steady rainfall," *Soils Found*, Vol. 56, No. 6, pp. 1071–1081, 2016.
- [8] R. Orense, K. Farooq, I. Towhata, "Deformation behavior of sandy slopes during rainwater infiltration," *Soils Found*, Vol. 44, No. 2, pp. 15–30, 2004.
- [9] S. M. Springman, A. Thielen, P. Kienzler, S. Friedel, "A long-term field study for the investigation of rainfall-induced landslides," *Geotechnique*, Vol. 63, No.14, pp. 1177–1193, 2013.
- [10] S. Ma, M. Ma, Z. Huang, Y. Hu, Y. Shao, "Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating," *Soils and Foundations*, Vol. 63, No. 3, 2023
- [11] A. Satyanaga, H. Rahardjo, "Role of unsaturated soil properties in the development of

- slope susceptibility map,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol. 175, No. 3, pp. 276-288, 2022.
- [12] C. Gallage, T. Abeykoon, T. Uchimura, “Instrumented model slopes to investigate the effects of slope inclination on rainfall-induced landslides,” *Soils Found*, Vol. 61, No.1, pp. 160–174, 2021.
- [13] R. Kitamura, K. Sako, “Contribution of “Soils and Foundations” to studies on rainfall-induced slope failure,” *Soils Found*, Vol. 50, No. 6, pp. 955–964, 2010.
- [14] M. Sawada, M. Mimura, “Geotechnical approaches for preservation of openly exhibited Geo-relics damaged by rainfall infiltration,” *Soils Found*, Vol. 62, No. 1, 2022
- [15] F. Valladares, D. Tena, S. Matesanz, E. Bochet, L. Balaguer, M. Costa-Tenorio, J. Tormo, P. Garcia-Fayos, “Functional traits and phylogeny: what is the main ecological process determining species assemblage in roadside plant communities?,” *Journal of Vegetation Sciences*, Vol. 19, pp. 381-392. Madrid, 2008.
- [16] D. Alifragkis, M. Vavelidis, B. Gazea, E. Voulgaridou, A. Galatsianou, E. Daftsis, “New Approaches To The Revegetation And Reclamation Of Old Tailing Management Facilities: The Example Of The Cassandra Mines Bulletin of the Geological Society of Greece,” *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Vol. 50, No. 4, pp. 2283, 2016.
- [17] J. W. Wagenbrenner, L. H. MacDonald, D. Rough, “Effectiveness of three post-fire rehabilitation treatments in the Colorado Front Range,” *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 2989–3006, 2006.
- [18] R. Sharma, S. Bhardwaj, 2017, “Effect of Mulching on Soil and Water Conservation-A Review,” *Agricultural Reviews*, Vol. 38, No. 4, pp. 311–315, 2017.
- [19] A. Sunandar, I. Andika, “Penerapan Teknologi Hydroseeding Dikombinasi Dengan Matras Organik Di Lereng Jalan Bebas Hambatan Manado-Bitung,” *Jurnal HPJI*, Vol. 6, No. 2, pp. 105-118, 2020.
- [20] Hardiyatmo, C. Hary, “Mekanika Tanah II Edisi ke tiga.” *Yogyakarta: Gadjah Mada University Press*, 2022.
- [21] R. Hidayat, “Analisis Pengaruh Infiltrasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng Di Pangkalan, Sumatera Barat,” *Jurnal Teknik Hidraulik*, Vol. 10, No. 1, pp 25-36, 2020.
- [22] M. Irsyam, A. Himawan, E. Susila E., “Bored Pile Solution for Embankment Failure on

Clay Shale: Design and Analyses of Static and Earthquake Conditions of the KM 97+500 Cipularang Toll Road in Indonesia,” *17 SEAGC*, pp. 109-112, Taipei, Taiwan, 2010.

- [23] Y. Li, A. Satyanaga, H. Rahardjo, “Characteristics of unsaturated soil slope covered with capillary barrier system and deep-rooted grass under different rainfall patterns,” *International Soil and Water Conservation Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 405-418, 2021.
- [24] J. Okovido, E. Obroku, “Evaluation of Four SWCCs Models' Flexibility for Selected Reconstituted Tropical Red Earth Soils,” *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, Vol. 10, No. 4, pp. 18-26, 2021.
- [25], [26] M. T. Van Genuchten, “A close form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil,” *Soil Sci Soc Am J*, Vol. 44, pp. 892–8, 1980.
- [26] R. F. Carsel, R. S. Parrish, “Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics,” *Water Resources Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 755-769, 1998.
- [27] K. Huang, B. P. Mohanty, M. Th. van Genuchten, “A new convergence criterion for the modified Picard iteration method to solve the variably saturated flow equation,” *Journal of Hydrology*, Vol 178, pp. 69-91, 1996.
- [28] T. Stark, J. Duncan, “Mechanisms of strength loss in stiff clays,” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp. 139-154, 1991.
- [29] A. W. Skempton, “Slope Stability of Cuttings in Brown Clay,” *Tokyo*, 1997.
- [30] S. S. Sandroni, “The Strength of London Clay in Total and Effective Stress Term,” *Ph.D. Thesis, University of London*, 1997.