KAJIAN KELONGSORAN GALIAN TANAH RESIDUAL DAN STABILISASI PAKU TANAH: STUDI KASUS JALAN TOL TRANS-SUMATERA

Andhika Sahadewa*
Kelompok Keahlian Rekayasa Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132
E-mail: sahadewa@itb.ac.id*
(*) Penulis Korespondensi
(Artikel dikirim: 22 Juni 2026, Direvisi: 8 Juli 2026, Diterima: 05 September 2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.30742/axial.v14i2.5622

ABSTRAK: Kelongsoran lereng terjadi pada ruas Jalan Tol Trans-Sumatera berpotensi menimbulkan gangguan terhadap keselamatan pengguna dan operasional jalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme kelongsoran pada tanah residual tropis serta penggunaan paku tanah sebagai solusi stabilisasi lereng. Observasi lapangan, penyelidikan tanah lapangan, dan uji laboratorium dilaksanakan pada awal studi untuk mengidentifikasi karakteristik fisis serta mineralogi tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi studi didominasi oleh tanah residual dengan mineral lempung kaolinit dan ilit. Metode kesetimbangan batas *Morgenstern-Price* dilakukan untuk analisis balik sehingga diketahui mekanisme kelongsoran dan parameter tanah saat kejadian longsor. Berbagai skenario perkuatan diuji, mulai dari pelandaian lereng, penambahan saluran subdrain, hingga penggunaan paku tanah. Mekanisme kelongsoran dipicu oleh infiltrasi air hujan yang menurunkan tegangan air pori negatif dan kekuatan geser tanah secara drastis. Kombinasi pelandaian lereng, pemasangan subdrain, dan penggunaan paku tanah terbukti mampu meningkatkan faktor keamanan dari 0,94 menjadi 2,20 hingga memenuhi kriteria desain. Penggunaan paku tanah yang menembus bidang gelincir hingga ke lapisan tanah yang stabil merupakan solusi efektif dalam menangani kelongsoran pada tanah residual tropis. Studi ini mengajukan metode kajian permasalahan longsor pada tanah residual tropis yang mengintegrasikan beberapa aspek, yaitu identifikasi material, mitigasi perkuatan lereng, dan pemantauan kinerja perkuatan lereng yang dapat diterapkan secara praktis.

KATA KUNCI : *Longsor, paku tanah, stabilitas lereng, tanah residual*

***ABSTRACT*:** *Slope failure occurring along a section of the Trans-Sumatra Toll Road potentially poses a threat to user safety and road operation. This study aims to investigate the failure mechanism in tropical residual soils and the application of soil nails as a slope stabilization solution. Field observations, in-situ soil investigations, and laboratory testing were conducted at the beginning of the study to identify the physical and mineralogical characteristics of the soil. The results indicate that the study site is dominated by residual soil with kaolinite and illite. The Morgenstern-Price limit equilibrium method was utilized for back-analysis to determine the failure mechanism and soil parameters at the time of failure. Various reinforcement scenarios were evaluated, ranging from slope flattening and the installation of subdrainage systems to the use of soil nails. The failure mechanism was triggered by rainfall infiltration, which drastically reduced the negative pore water pressure and soil shear strength. The combination of slope flattening, subdrain installation, and soil nailing was proven to increase the factor of safety from 0.94 to 2.20 to meet the design criteria. The use of soil nails that penetrate through the slip surface into the stable soil layer offers an effective solution for mitigating slope failures in tropical residual soils. This study proposes a framework for evaluating landslide problems in tropical residual soils by integrating some aspects, namely material identification, soil stabilization, and performance monitoring of slope stabilization that is simple for practical applications.*

KEYWORDS: *Landslide, residual soil, slope stability, soil nailing*

1. PENDAHULUAN

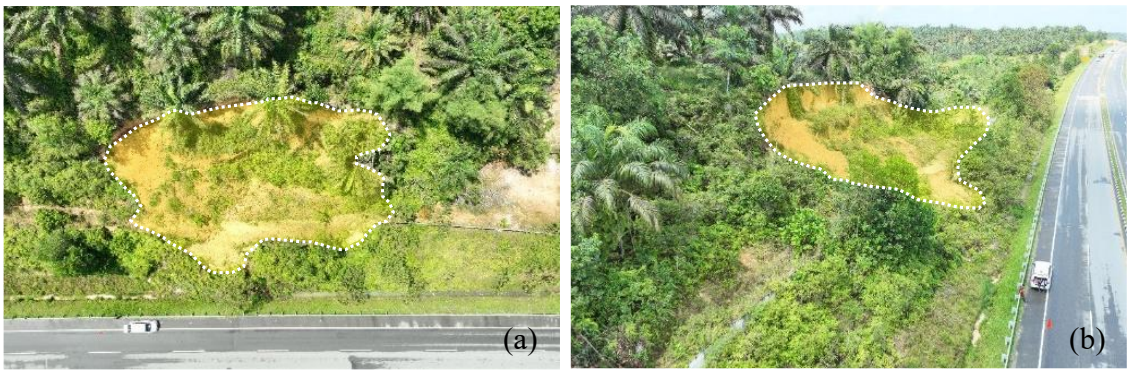
Kelongsoran lereng seringkali mempengaruhi operasional infrastruktur di sekitarnya. Hal ini termasuk keruntuhan lereng di pinggir jalan tol yang berdampak langsung terhadap keselamatan pengguna dan kinerja jalan tol tersebut. Sebuah lereng di sekitar ruas jalan bebas hambatan antara Pekanbaru dan Dumai, bagian dari Jalan Tol Trans-Sumatera (JTTS), mengalami kelongsoran. Lereng tersebut berada pada tepi

Copyright (c) 2026 axial : jurnal rekayasa dan manajemen konstruksi. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ISSN 2337-6317 (PRINT); ISSN 2615-0824 (ONLINE)

axial, Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi Vol. 14, No.2, Agustus 2026, Hal. 222 - 234

lahan milik jalan tol yang berbatasan langsung dengan perkebunan sawit. Area longsoran memiliki lebar sekitar 20 m pada lereng dengan kemiringan yang relatif curam. Keberadaan tanah residual tropis terindikasi pada kelongsoran ini. **Gambar 1** memperlihatkan tampak atas dan samping longsor tersebut, secara berturut-turut.



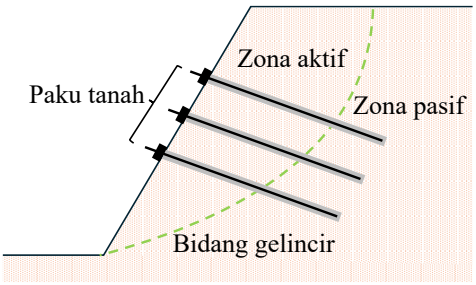
Gambar 1. Longsor Tampak: (a) Atas dan (b) Bawah
(Sumber: Dokumentasi kunjungan lapangan)

Secara umum, berdasarkan proses deposisi dan pembentukannya, tanah diklasifikasikan ke dalam 2 kategori, yaitu tanah residual dan tanah transportasi/terangkut/sedimen (Das & Sobhan, 2018). Salah satu jenis tanah transportasi yang sering ditemui di Indonesia adalah tanah aluvial. Tanah aluvial material awalnya terkikis, terangkut, dan terendapkan oleh aliran air sungai. Sebaliknya, tanah residual terbentuk secara langsung di tempat akibat pelapukan mekanis atau kimiawi batuan induknya tanpa terjadi perpindahan lokasi.

Tanah residual tropis memberikan beberapa tantangan, yaitu (1) variabilitas ukuran partikel yang tinggi, (2) rentan terhadap hujan, (3) sensitivitas tinggi, (4) potensi kesalahan klasifikasi laboratorium, dan (5) kehadiran isapan matriks (*matric suction*). Hal-hal tersebut dibahas secara mendetail pada Wesley (2010), Fredlund et al. (2012), Meng & Chu (2011), Blight & Leong (2012), dan Fookes (1997). Sehubungan dengan isapan matriks, Krisnanto et al. (2022) dan Krisnanto (2023) menyarankan pengembangan basis data parameter-parameter tanah di Indonesia yang berpengaruh pada isapan matriks sebelum nilainya dapat digunakan menyeluruh untuk keperluan praktis.

Permasalahan geoteknik akibat tanah residual tropis di Indonesia masih relatif kurang mendapat perhatian dalam literatur dibandingkan permasalahan akibat tanah lunak, tanah ekspansif, tanah organik, dan gambut dalam perencanaan infrastruktur. Padahal kasus longsor galian pada tanah residual tropis, seperti pada studi kasus ini, juga memiliki potensi mengganggu operasional jalan tol. Literatur kestabilan lereng tanah residual tropis di Indonesia pun masih sangat terbatas dibandingkan kasus tanah problematik lainnya. Literatur terkini terkait tanah residual tropis di antaranya adalah Krisnanto & Rahardjo (2021), Mina et al. (2025), Melhan et al. (2026), dan Salamah et al. (2026). Berdasarkan kajian literatur, studi terdahulu masih belum mengintegrasikan sebuah metode kajian yang melingkupi identifikasi tanah residual tropis, mitigasi perkuatan lereng yang tepat, dan acuan pemantauan (*monitoring*) kinerja perkuatan lereng yang semuanya dapat digunakan untuk kepentingan praktis.

Paku tanah (*soil nailing*) merupakan salah satu sistem perkuatan lereng. Sistem ini dipasang dengan cara memasukan batang besi ulir (*reinforcement bar*) dengan kemiringan tertentu ke dalam lubang bor tanah pada muka lereng (**Gambar 2**). Lubang ini selanjutnya diisi dengan mortar semen atau grout. Muka lereng diperkuat dengan beton pracetak ataupun beton semprot (*reinforced shotcrete*).



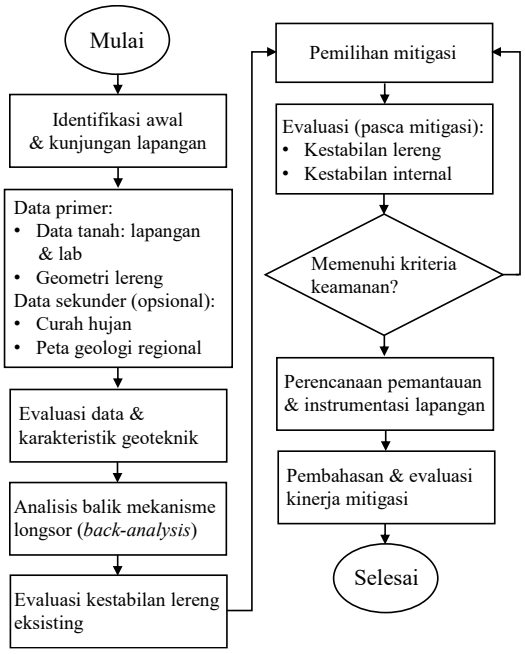
Gambar 2. Skema Paku Tanah
(Sumber: Penulis)

Pada artikel ini disampaikan kajian mekanisme kelongsoran tanah residual tropis dan aplikasi paku tanah untuk penanganan longsor. Studi ini mengambil kasus kelongsoran pada ruas Jalan Tol Pekanbaru–Dumai. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui mekanisme kelongsoran,

prosedur langkah identifikasi material tanah residual tropis dan penanganan longsor menggunakan paku tanah. Berbeda dengan studi stabilisasi lereng yang umumnya langsung mengevaluasi efektivitas sebuah metode perkuatan lereng pada tanah lunak, tanah ekspansif, tanah organik, atau gambut, penelitian ini memiliki kebaruan berupa integrasi investigasi lapangan, karakterisasi/identifikasi tanah residual tropis, analisis balik mekanisme kelongsoran, evaluasi bertahap beberapa alternatif mitigasi, serta rekomendasi pengamatan kinerja perkuatan lereng pasca-konstruksi. Sebagian besar studi terdahulu berfokus pada pemahaman terhadap karakteristik tanah residual, penerapan sistem perkuatan lereng, serta sistem pengamatan kinerja perkuatan lereng secara terpisah. Penelitian ini menggabungkan aspek-aspek penting tersebut dalam satu kerangka kajian yang dapat diterapkan secara praktis untuk menangani permasalahan geoteknik pada tanah residual tropis.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi kasus ini ditampilkan dalam bagan alir pada **Gambar 3**.



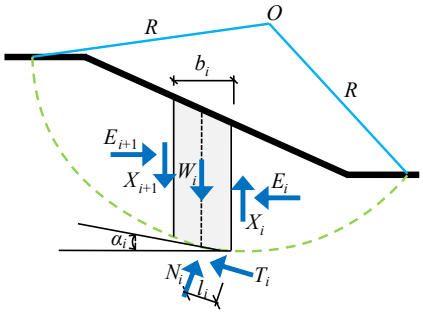
Gambar 3. Bagan Alir Penelitian
(Sumber: Hasil penelitian)

Lingkup studi di artikel ini difokuskan pada dua aspek utama, yaitu: (1) penyusunan kerangka kajian untuk penanganan kelongsoran pada tanah residual tropis yang mencakup identifikasi karakteristik tanah, evaluasi dan pemilihan metode mitigasi, serta perencanaan sistem pemantauan, dan (2) identifikasi material serta perencanaan teknis mitigasi berdasarkan hasil investigasi lapangan, pengujian laboratorium, dan analisis kestabilan lereng.

2.1 Evaluasi Kestabilan Lereng

Evaluasi kestabilan lereng pada studi kasus ini dilakukan menggunakan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium*). Secara khusus, evaluasi ini dilakukan dengan menerapkan metode irisan (*method of slices*). Metode ini dapat dikerjakan berdasarkan cara yang diajukan oleh Bishop (1955), Spencer (1967), Janbu (1954, 1973), dan Morgenstern & Price (1965, 1967).

Metode keseimbangan batas mengasumsikan bahwa tanah di atas permukaan bidang gelincir dibagi menjadi beberapa irisan atau blok dengan bidang pembagi antar irisan yang selalu vertikal. Gaya yang bekerja pada masing-masing irisan ditampilkan pada **Gambar 4**, dengan X_i = Gaya geser yang bekerja antara tiap blok, E_i = Gaya normal yang bekerja antara tiap blok, T_i = Gaya geser pada tiap segmen permukaan gelincir, N_i = Gaya normal pada tiap segmen permukaan gelincir, W_i = Berat tiap blok, b_i = lebar tiap blok, α_i = kemiringan dasar tiap blok terhadap horizontal, l_i = titik kerja N_i, dan R = lengan momen bidang gelincir terhadap titik O. Setiap metode irisan individu memiliki asumsi dalam memenuhi persamaan gaya keseimbangan dan persamaan momen keseimbangan terhadap titik O.



Gambar 4. Gaya yang Bekerja pada Tiap Irisan
(Sumber: Penulis)

Pada kajian ini digunakan Metode *Morgenstern-Price*. Metode ini memenuhi ketiga persamaan keseimbangan, yaitu persamaan gaya keseimbangan dalam arah horizontal dan vertikal serta persamaan keseimbangan momen yang bekerja pada masing-masing irisan. Metode Morgenstern-Price tidak mengabaikan gaya antar irisan. Resultan gaya geser dan gaya normal

ISSN 2337-6317 (PRINT); ISSN 2615-0824 (ONLINE)

axial, Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi Vol. 14, No.2, Agustus 2026, Hal. 222 - 234

yang bekerja antar irisan mempunyai kemiringan yang berbeda pada tiap irisan. Perhitungan faktor keamanan (FK) atau *safety factor* (SF) stabilitas timbunan diperoleh melalui iterasi kemiringan gaya yang bekerja antara irisan dan FK tersebut. Pembahasan lebih lanjut tentang metode ini dapat ditemukan di Morgenstern & Price (1965, 1967). Perhitungan FK dibahas lebih detail pada Zhu et al. (2005). Angka FK ini dibutuhkan untuk mengkaji stabilitas global sistem perkuatan lereng.

2.2 Metode Perkuatan Lereng Paku Tanah

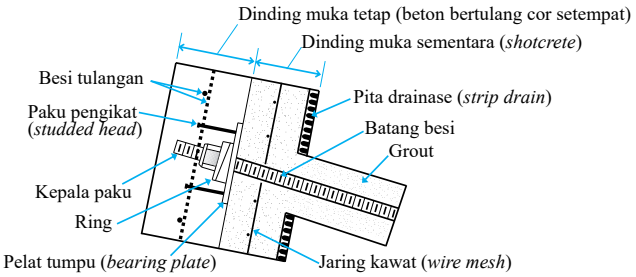
Perkuatan lereng menggunakan paku tanah dilakukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia/SNI (2017), yaitu SNI Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460: 2017). Beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan ini adalah: (1) stabilitas global, dan (2) stabilitas internal. Stabilitas global diperlukan untuk mengkaji stabilitas dinding paku tanah terhadap kelongsoran. Stabilitas internal dibutuhkan untuk memeriksa kekuatan komponen-komponen dalam perkuatan paku tanah (*i.e.*, batang paku tanah, dinding muka/*facing wall*, dsb.). SNI 8460: 2017 merekomendasikan nilai minimum FK untuk paku tanah (**Tabel 1**). Nilai ini bergantung pada jenis kegagalan dan kondisi beban.

Tabel 1. Faktor Keamanan

FK Minimum		Stabilitas global	Basal *heave*	Gelincir lateral	Cabut paku	Tarik	*Punching* dinding
Jangka	Panjang	1,3	2,0	1,5[a]	2,0[a]	1,8[a]	1,5[a]
	Pendek	1,5	2,5				
Gempa		1,1	-	1,1	1,5	1,3	1,1

[a]SNI 8460: 2017 tidak menjelaskan secara detail FK untuk kondisi jangka panjang/pendek
(Sumber: SNI 8460: 2017)

Paku tanah direncanakan berdasarkan keseimbangan gaya yang terjadi padanya. Paku tanah seringkali menjadi kesatuan dengan dinding muka beton (dinding kover). Contoh koneksi antara paku tanah dengan dinding muka ditampilkan pada **Gambar 5**. Perencanaan paku tanah secara detail dapat dilihat pada Federal *Highway Administration* / FHWA *Geotechnical Engineering Circular* no. 7 (Lazarte et al., 2015) dan SNI 8460: 2017. Studi parametrik untuk perkuatan lereng menggunakan paku tanah dapat dilihat pada Elahi et al. (2022) dan Hakim et al. (2025b).



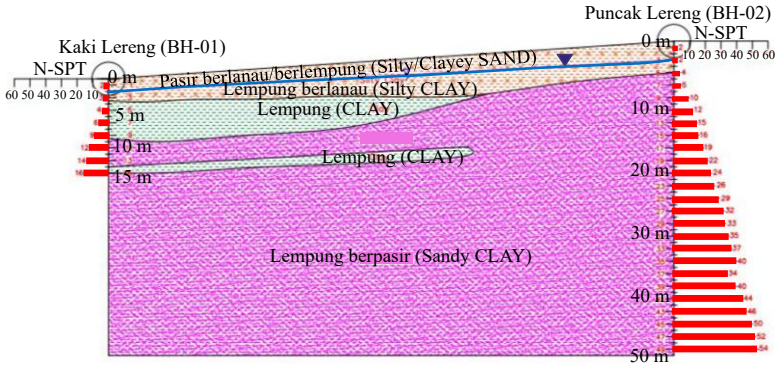
Gambar 5. Tipikal Koneksi Paku Tanah dan Dinding Muka
(Sumber: Penulis)

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kondisi Tanah

Penyelidikan tanah dilakukan pada lokasi studi dengan mengambil 2 titik bor dalam dengan uji standar penetrasi (*Standard Penetration Test*/SPT) dan 1 titik sondir (*Cone Penetration Test*/CPT) pasca kelongsoran. Bor dalam masing-masing dilakukan di puncak (BH-02) dan kaki lereng (BH-01), sedangkan sondir dilakukan pada tengah lereng. Hasil penyelidikan tanah digunakan untuk memperkirakan kondisi lapisan tanah di lokasi studi (**Gambar 6**). Lapisan pasir berlanau/berlempung dengan nilai N-SPT antara 2 – 4 ditemukan pada permukaan hingga kedalaman sekitar 3 m – 5 m. Pada kedalaman berikutnya, tanah didominasi oleh lapisan lempung dengan sisipan lanau ataupun pasir dengan nilai N-SPT yang cenderung meningkat terhadap kedalaman. Pada akhir pengeboran ditemukan tanah lempung yang kompeten dengan konsistensi keras. Sampel tidak terganggu diperoleh dari pelaksanaan bor dalam untuk digunakan dalam uji laboratorium. Hasil uji laboratorium *specific gravity* (G_s), berat

jenis basah (γ_{basah}), berat jenis kering (γ_{kering}), porositas (n), derajat kejenuhan (S_r), kadar air (w_n), batas cair (LL), batas plastis (PL), indeks plastisitas (PI), serta distribusi ukuran butir, ditampilkan pada **Tabel 2** dan **Gambar 7**.

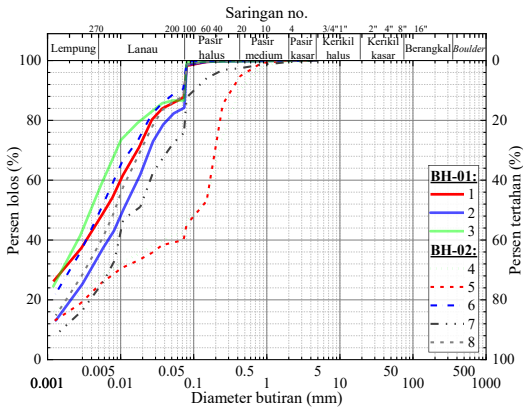


Gambar 6. Stratigrafi Tanah di Lokasi Studi
(Sumber: Hasil penelitian)

Tabel 2. Hasil Uji Laboratorium

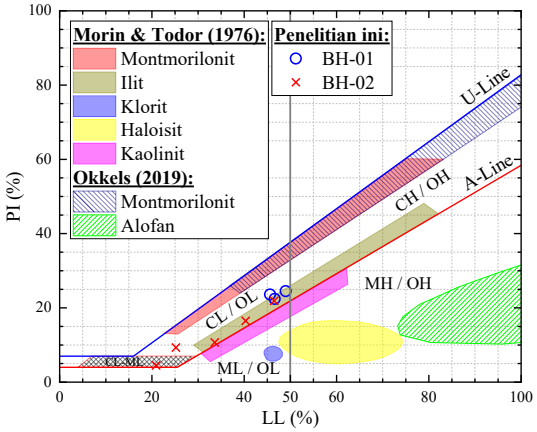
No	Titik	G_s	Berat jenis (kN/m^3)		n	S_r	W_n	Batas Atterberg (%)		
			γ_{basah}	γ_{kering}		(%)	(%)	LL	PL	PI
1		2,72	18,60	13,65	0,50	99,14	36,19	45,63	22,01	23,61
2	BH-01	2,72	18,44	13,36	0,51	99,91	37,98	46,60	24,24	22,36
3		2,73	18,78	14,56	0,47	90,26	28,96	48,98	24,50	24,48
4		2,71	18,80	15,15	0,44	82,64	24,09	25,22	15,95	9,27
5		2,76	18,71	15,59	0,43	71,72	20,00	20,90	16,42	4,48
6	BH-02	2,74	18,65	13,91	0,49	96,08	34,05	46,50	24,63	21,87
7		2,77	17,91	12,42	0,55	99,59	44,22	33,59	22,92	10,67
8		2,77	18,80	13,90	0,50	98,31	35,30	40,27	23,79	16,48

(Sumber: Hasil penelitian)



Gambar 7. Distribusi Ukuran Butiran
(Sumber: Hasil penelitian)

Pengamatan lapangan menunjukkan bahwa lokasi studi merupakan tanah residual tropis. Hasil uji laboratorium digunakan untuk memperkuat hal ini. **Gambar 8** memperlihatkan perkiraan jenis mineralogi pada tanah di lokasi studi. Secara umum, mineral lempung tersebut berupa ilit (*illite*) dan kaolinit (*kaolinite*) berdasarkan Morin & Todor (1975) dan Okkels (2019). Perkiraan ini konsisten dengan hasil uji *X-Ray Diffraction* (XRD) yang membuktikan keberadaan dominasi ilit dan kaolinit. XRD juga menunjukkan bahwa fraksi pasir di lokasi studi merupakan kuarsa (*quartz*).



Gambar 8. Estimasi Jenis Mineral Lempung pada Lokasi Studi
(Sumber: Hasil penelitian)

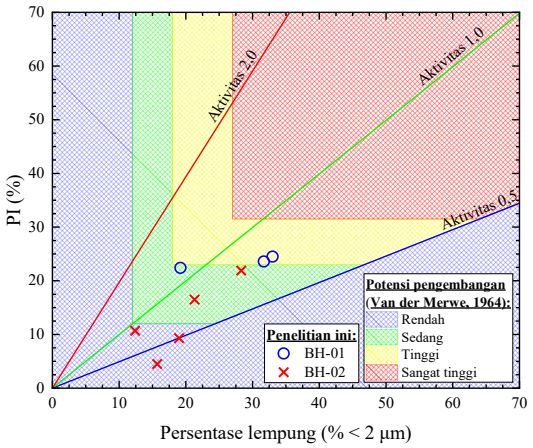
Hasil uji laboratorium digunakan untuk mengevaluasi aktivitas tanah atau *soil activity*

ISSN 2337-6317 (PRINT); ISSN 2615-0824 (ONLINE)

(A) yang dihitung sebagai rasio PI terhadap persentase lempung (CF) sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$A = \frac{PI}{CF} \quad (1)$$

Nilai aktivitas tanah beserta potensi pengembangan tanah (*swelling*) berdasarkan usulan Van der Merwe (1964) ditunjukkan pada **Gambar 9**. Aktivitas tanah mayoritas berada pada rentang 0,5 hingga 1,0 dengan variasi potensi pengembangan tanah dari rendah hingga tinggi.



Gambar 9. Aktivitas dan Potensi Pengembangan Tanah
(Sumber: Hasil penelitian)

Karakteristik stratigrafi dan hasil uji laboratorium pada lokasi studi konsisten dengan ciri tanah residual tropis yang merupakan akumulasi hasil pelapukan batuan secara in-situ. Profil pelapukan vertikal teridentifikasi dengan jelas dari nilai N-SPT yang meningkat signifikan dengan bertambahnya kedalaman. Lapisan atas hingga kedalaman sekitar 5 m merupakan zona tanah residual matang yang didominasi oleh material pasir berlempung atau berlanau. Seiring bertambahnya kedalaman, batuan induk biasanya kurang mengalami degradasi fisis sehingga masih memiliki nilai N-SPT yang relatif besar. Pada kedalaman 20 m bahkan ditemukan nilai N-SPT > 50. Ciri tanah residual ini juga diperkuat oleh mineralogi yang didominasi oleh mineral lempung sekunder non-ekspansif, yaitu kaolinit dan ilit, daripada montmorilonit (*montmorillonite*). Wesley (2010) dan Wilson (1999) menyampaikan bahwa kedua jenis mineral tersebut umum ditemukan pada tanah residual tropis. Nait-Rabah et al. (2023) melaporkan studi kasus kaolinit menjadi salah satu indikasi tanah residual tropis. Mineral tersebut berasal dari hasil pencucian (*leaching*) intensif yang umum terjadi pada iklim tropis. Potensi pengembangan tanah yang berada pada rentang rendah hingga batas menengah-tinggi konsisten dengan sifat kedua mineral tersebut yang memiliki potensi pengembangan di bawah montmorilonit. Penulis menganggap bahwa karakteristik fisis, mekanis, dan mineralogi tersebut menegaskan bahwa tanah di lokasi studi tidak dipengaruhi oleh riwayat sedimentasi aluvial yang cenderung homogen. Namun, tanah tersebut dipengaruhi oleh proses pelapukan vertikal batuan induk secara in-situ dari sebuah formasi yang heterogen.

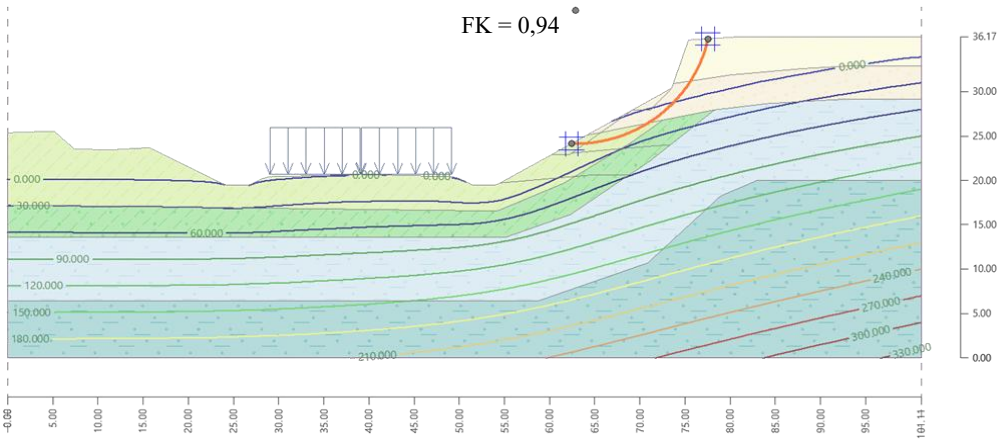
3.2 Mekanisme Kelongsoran

Pada daerah beriklim tropis, sebagaimana lokasi longsoran dalam studi ini, seringkali ditemukan tanah residual. Hipotesis mekanisme kelongsoran di lokasi studi berkaitan dengan hujan. Kawasan beriklim tropis basah umumnya ditandai dengan curah hujan tahunan yang tinggi. Tingginya curah hujan menyebabkan proses infiltrasi air pada tanah residual yang kemudian menurunkan bahkan menghilangkan tegangan air pori negatif atau isapan matriks. Padahal, tegangan air pori negatif ini turut membantu kuat geser tanah (*shear strength*). Pada akhirnya, kekuatan geser lapisan tanah residual tropis turun secara drastis. Selanjutnya, kelongsoran terjadi saat tanah semakin jenuh air dan kondisi batas kuat kritis tanah terlampaui oleh beban yang ada. Krisnanto & Rahardjo (2021) membahas secara detail kestabilan lereng tanah residual tropis yang dipengaruhi hujan.

Evaluasi mekanisme kelongsoran pada studi ini dilakukan menggunakan geometri sebelum dan sesudah kejadian longsor. Geometri sebelum kejadian longsor mengacu kepada gambar terbangun pada seksi jalan terkait. Geometri setelah kelongsoran dibuat berdasarkan hasil pekerjaan survei topografi pasca kelongsoran. Stratigrafi lapisan tanah diperkirakan berdasarkan BH-01 dan BH-02.

Mekanisme penyebab proses keruntuhan lereng serta parameter tanah diprediksi menggunakan analisis balik stabilitas lereng. Analisis tersebut dilakukan menggunakan program geoteknik GEO5 dengan metode kesetimbangan batas melalui iterasi "*trial and error*" parameter kuat geser tanah dari dua lapisan teratas dan kondisi aliran atau rembesan di dalam tanah (*seepage*). Parameter kuat geser tanah efektif dipilih mengingat kondisi lapangan berupa lereng galian. Hasil analisis balik mungkin bukan merupakan satu-satunya solusi (i.e., *non-unique solution*). Namun, pendekatan analisis balik ini dilakukan dengan mempertimbangkan batasan-batasan dan kewajaran dari investigasi lapangan, hasil uji laboratorium, kondisi geologi, serta observasi geometri longsor di lapangan.

Hasil analisis balik menunjukkan lereng dapat mengalami keruntuhan yang relatif dangkal seperti kejadian di lapangan. Kondisi ini ditunjukkan oleh nilai FK = 0,94 untuk analisis kestabilan lereng kondisi statik (**Gambar 10**). Longsor dangkal lebih mungkin terjadi pada lereng galian yang telah bertahan selama beberapa tahun dibandingkan dengan longsor dalam. Dalam hal ini, pada awalnya lereng memiliki kestabilan yang cukup memadai. Namun, lapisan tanah residual tropis pada permukaan galian cenderung mengalami siklus basah-kering, pelapukan lanjutan, ataupun infiltrasi hujan yang menurunkan kuat geser lapisan tanah tersebut hingga terjadinya longsor permukaan. Uji N-SPT juga menunjukkan tanah yang lebih kompeten seiring bertambahnya kedalaman. Hasil analisis balik ini juga digunakan untuk menentukan parameter tanah yang digunakan untuk stabilisasi lereng tanah residual di lokasi studi. Parameter tanah yang digunakan, yaitu angka Poisson (υ), berat jenis tanah jenuh (γ_{sat}), kuat geser niraliran (S_u), kohesi efektif (c'), dan sudut geser dalam efektif (φ'), dapat dilihat pada **Tabel 3**.



Gambar 10. Bidang Gelincir Kritis Hasil Analisis Balik
(Sumber: Hasil penelitian)

Tabel 3. Parameter Tanah

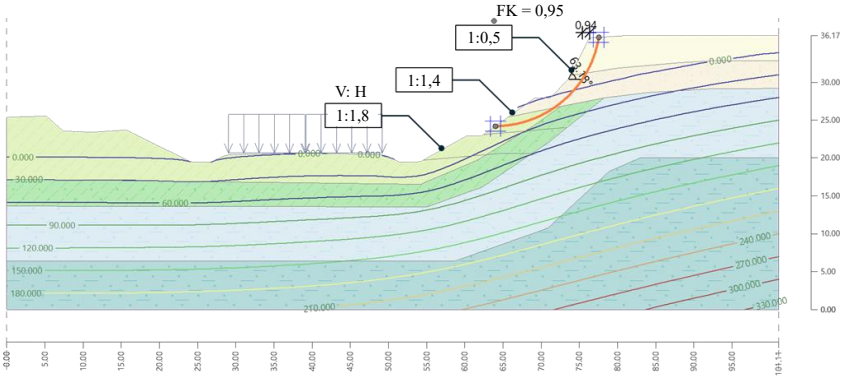
Elevasi (m)	Jenis Tanah	N-SPT	υ	γ_{basah} (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	S_u (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)
0 - 4	*Silty SAND*	4	0,33	18	19	-	0	29
4 - 8	*Silty SAND*	4	0,33	18	19	-	1	30
8 - 18	*CLAY*	10 - 16	0,32	18	19	70	25	28
18 - 30	*Sandy CLAY*	19 - 35	0,32	18	19	150	30	33

(Sumber: Hasil penelitian)

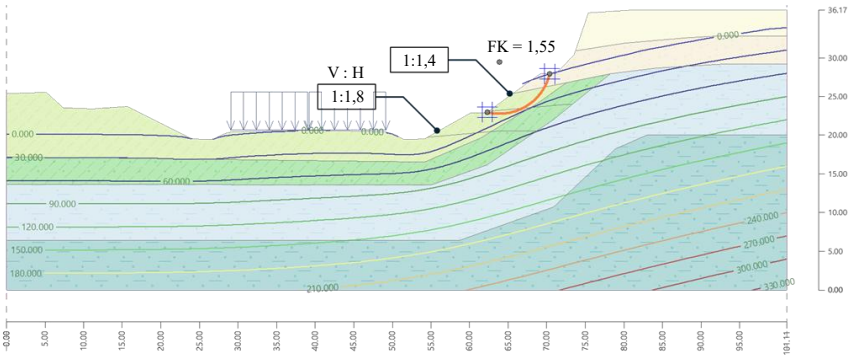
3.3 Stabilisasi Lereng

Pemilihan metode stabilisasi lereng secara umum dimulai dengan menggunakan cara yang paling mudah serta efisien. Jika penanganan tersebut belum menghasilkan kestabilan yang diharapkan, metode alternatif lainnya harus diajukan. Dalam studi kasus ini, penanganan yang dipilih dimulai dari pelandaian lereng atau *re-sloping*. Lereng direncanakan memiliki 3 level berundak (*i.e.*, *berm*, *bench*, atau *trap*). Pelandaian dilakukan pada masing-masing tingkat. Hasil analisis menunjukkan FK kondisi statik sebesar 0,95 dengan bidang gelincir pada tingkat undak teratas (**Gambar 11**). Nilai ini masih berada di bawah kriteria stabil. *Berm* tingkat yang lebih rendah cenderung stabil dengan FK memenuhi persyaratan minimum (**Gambar 12** dan **Gambar 13**).

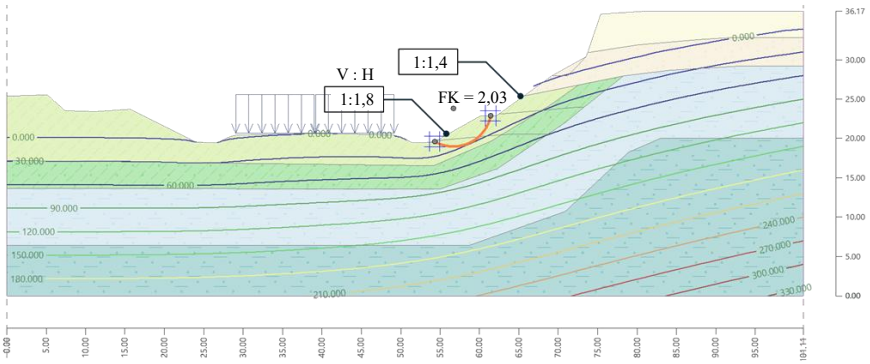
ISSN 2337-6317 (PRINT); ISSN 2615-0824 (ONLINE)



Gambar 11. Analisis Stabilitas Kondisi Statik Bidang Runtuh 1 Mitigasi: Pelandaian
(Sumber: Hasil penelitian)

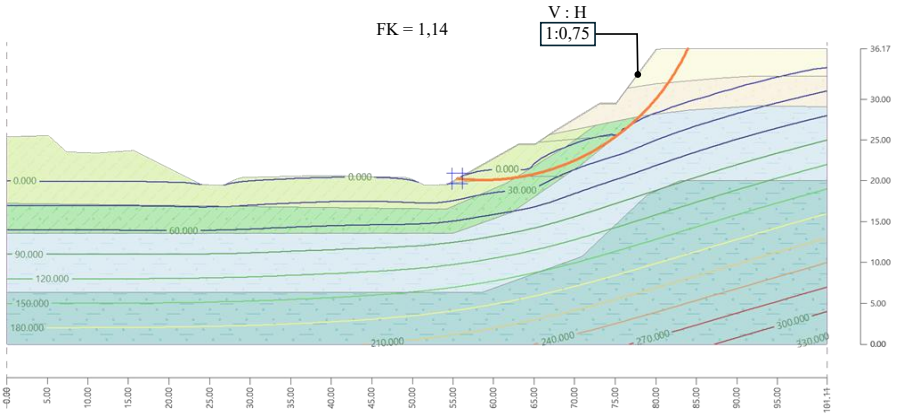


Gambar 12. Analisis Stabilitas Kondisi Statik Bidang Runtuh 2 Mitigasi: Pelandaian
(Sumber: Hasil penelitian)



Gambar 13. Analisis Stabilitas Kondisi Statik Bidang Runtuh 3 Mitigasi: Pelandaian
(Sumber: Hasil penelitian)

Penanganan tambahan dilakukan untuk meningkatkan FK pada lereng *berm* teratas. Lereng *berm* teratas lebih dilandaikan menjadi 1(V): 0,75(H). Selain itu, subdrain ditambahkan mengingat kestabilan lereng tanah residual tropis berhubungan dengan hujan. Penanganan ini mampu meningkatkan FK kondisi statik menjadi 1,14 (**Gambar 14**). Nilai ini menunjukkan lereng yang sudah stabil dengan penambahan subdrain. Saluran subdrain membantu menurunkan tekanan air pori berlebih sehingga kuat geser efektif tanah relatif lebih besar daripada kuat gesernya tanpa subdrain. Dengan demikian, kondisi kestabilan lereng dengan subdrain cenderung memberikan FK yang lebih besar. Namun, nilai ini masih lebih rendah dari persyaratan minimum yang diperlukan.

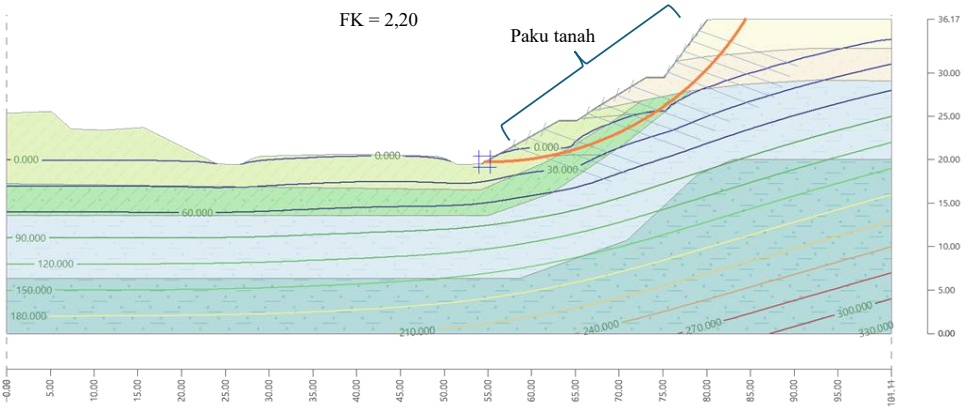


Gambar 14. Analisis Stabilitas Kondisi Statik Bidang Runtuh 1 Mitigasi: Pelandaian dan Subdrain
(Sumber: Hasil penelitian)

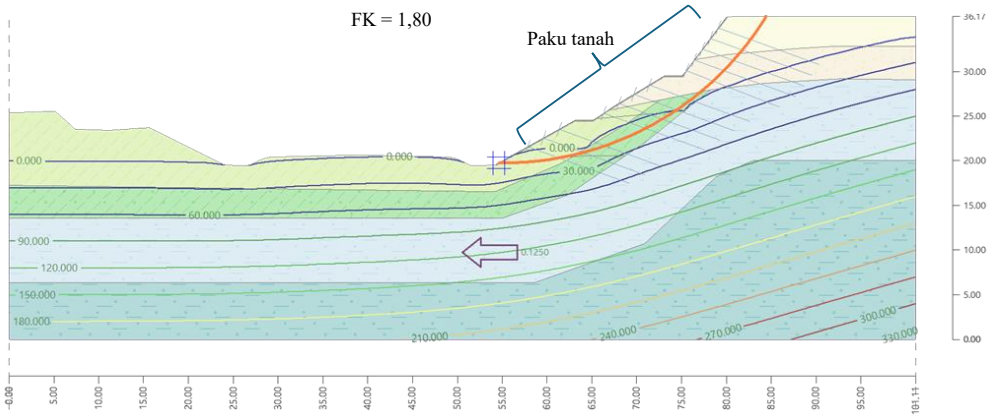
Paku tanah pada studi kasus ini dipilih untuk menyempurnakan penanganan stabilisasi lereng. Paku tanah memiliki mekanisme efektif dalam menangani tanah residual tropis. Dalam hal ini, karakteristik longsoran setempat yang relatif dangkal dapat ditangani melalui penetrasi paku melampaui bidang gelincir untuk menjangkau lapisan tanah yang stabil dan kompeten. Metode instalasi paku yang umumnya sedikit getaran mampu menjadi aspek penting untuk mencegah kerusakan pada sisa lereng yang kritis dan sangat sensitif terhadap gangguan (Blight & Leong, 2012). Phan & Gui (2019) mendeskripsikan penggunaan paku tanah untuk penanganan La Son–Tuy Loan Highway di Vietnam. Hakim et al. (2025a) membahas penggunaan paku tanah pada lereng Sungai Ciliwung, Jakarta. Selain itu, paku tanah juga diajukan oleh Iftikhar & Artati (2024) sebagai penanganan longsor akibat Gempa Cianjur 2022.

Analisis penanganan dengan tambahan paku tanah menunjukkan FK kondisi statik sebesar 2,2 (**Gambar 15**). Paku tanah berkuat leleh 490 MPa dengan panjang 12 m dan diameter 32 mm direncanakan dipasang dengan sudut 20° terhadap horizontal. Jarak antara paku-paku tanah adalah 2 m. Lubang paku tanah berdiameter 150 mm dan diisi oleh grout dengan kuat tekan (f'_c) 30 MPa. Parameter paku tanah tersebut dipilih dari serangkaian analisis yang yang mampu memenuhi semua persyaratan perencanaan. Dengan demikian, mitigasi ini merupakan salah satu alternatif efisien yang mampu memenuhi seluruh kriteria teknis dengan dimensi paku tanah minimum. Contoh analisis stabilitas dalam kondisi gempa dengan penanganan pelandaian, subdrain, dan paku tanah ditampilkan pada **Gambar 16**.

Kestabilan lereng dengan paku tanah juga harus dievaluasi untuk bidang gelincir yang tidak memotong paku tanah. Nilai-nilai FK yang diperoleh dari analisis dengan penanganan gabungan 3 metode sudah memenuhi kriteria desain. Seluruh ketentuan FK minimum yang terdapat pada **Tabel 1** telah dievaluasi melalui program geoteknik GEO5.



Gambar 15. Analisis Stabilitas Kondisi Statik Bidang Runtuh 1 Mitigasi: Pelandaian, Subdrain, dan Paku Tanah
(Sumber: Hasil penelitian)



Gambar 16. Analisis Stabilitas Kondisi Gempa Bidang Runtuh 1 Mitigasi: Pelandaian, Subdrain, dan Paku Tanah
(Sumber: Hasil penelitian)

Kapasitas tarik paku tanah harus diverifikasi dengan uji tarik lapangan untuk dibandingkan dengan kapasitas tarik yang dibutuhkan. SNI 8460: 2017 menyaratkan uji tarik sejumlah 5% dari seluruh paku tanah dengan beban hingga 150% gaya tarik maksimum.

Aliran air permukaan dari puncak lereng perlu diatur dengan membuat drainase di sekitar puncak lereng. Drainase tersebut dialirkan ke saluran terdekat di luar badan lereng. Selain itu, horizontal subdrain menjadi salah satu kunci keberhasilan dalam menjaga kestabilan lereng terutama saat musim hujan. Perawatan rutin berkala disarankan untuk membersihkan drainase ini dari berbagai endapan yang bisa mengurangi kapasitas dan fungsi horizontal subdrain.

3.4 Pemantauan

Konstruksi lereng atau mitigasi longsor memiliki keterbatasan berupa metode analisis dengan berbagai asumsi maupun parameter tanah yang bervariasi. Dalam hal ini, perencanaan ataupun mitigasi yang telah dipilih masih memiliki kemungkinan kejadian longsor. Agar risiko kelongsoran lereng dapat terukur sesuai dengan kondisi di lapangan, diperlukan sistem pemantauan dan instrumentasi. Sistem ini juga berfungsi sebagai peringatan dini kelongsoran lereng. Sistem ini setidaknya memerlukan inklinometer untuk mengukur pergerakan lereng. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (2002) melalui Panduan Geoteknik 4 merekomendasikan sistem pemantauan dan instrumentasi untuk (1) mengontrol prosedur dan jadwal pelaksanaan konstruksi, (2) mendampingi desain dengan ketidakpastian tinggi dan faktor keamanan terbatas, serta (3) mengevaluasi kinerja metode perkuatan lereng terpilih.

Kriteria pergerakan lereng dapat mengacu pada **Tabel 4** yang direkomendasikan oleh *International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides*/IUGS-WGL (1995) dan Cruden & Varnes (1996). Level peringatan pergerakan lereng yang direkomendasikan oleh Public Works Research Institute/PWRI (2007) berdasarkan tingkat perpindahan dapat digunakan sebagai acuan peringatan dini (**Tabel 5**).

Tabel 4. Klasifikasi Pergerakan Lereng

Level	Deskripsi	Pergerakan (mm/detik)	Pergerakan tipikal
7	Luar biasa cepat	5×10^{3}	5 m/detik
6	Sangat cepat	5×10^{1}	3 m/detik
5	Cepat	5×10^{-1}	1,8 m/jam
4	Sedang	5×10^{-3}	13 m/bln
3	Lambat	5×10^{-5}	1,6 m/thn
2	Sangat lambat	5×10^{-7}	16 mm/thn
1	Luar biasa lambat	-	-

(Sumber: IUGS-WGL, 1995 dan Cruden & Varnes, 1996)

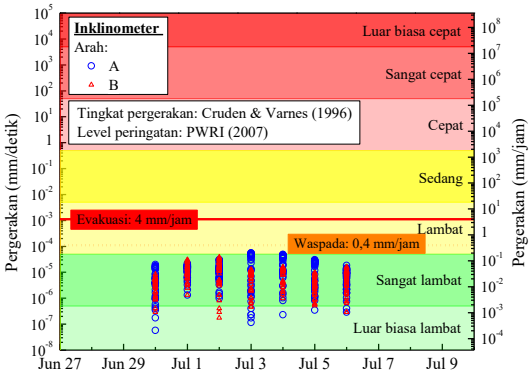
Tabel 5. Level Peringatan Pergerakan Lereng

Pergerakan (mm/jam)	Level peringatan
0,4	Waspada
> 4,0	Evakuasi

(Sumber: PWRI, 2007)

Instrumentasi berupa 2 buah inklinometer, masing-masing pada kaki dan puncak lereng, harus dipasang untuk mengamati pergerakan lereng yang terjadi. Pemantauan pergerakan lereng sebanyak 2 kali sehari selama sekurang-kurangnya 1 bulan harus dilaksanakan untuk

mengevaluasi kinerja penanganan longsor. Kegiatan di sekitar lereng harus dihentikan jika nilai-nilai batas dari hasil bacaan pemantauan terlewati. Selanjutnya, kestabilan lereng harus ditinjau ulang dan diperkuat untuk menyesuaikan kondisi lapangan terkini. **Gambar 17** merupakan ilustrasi penerapan sistem pemantauan pergerakan lereng yang direkomendasikan.



Gambar 17. Ilustrasi Hasil Pemantauan Pergerakan Lereng
(Sumber: Hasil penelitian)

4 KESIMPULAN

Satu ruas Jalan Tol Pekanbaru–Dumai mengalami kelongsoran. Karakteristik tanah residual di lokasi tersebut terlihat dari mineralogi yang merupakan mineral lempung sekunder non-ekspansif, seperti kaolinit dan ilit. Prediksi kandungan mineral lempung berdasarkan Morin & Todor (1975), Okkels (2019), dan Nait-Rabah et al. (2023) pada studi ini konsisten dengan hasil XRD. Hal ini menunjukkan bahwa metode identifikasi sederhana berdasarkan *LL* dan *PI* berpotensi digunakan sebagai indikasi awal karakterisasi tanah residual tropis jika data XRD belum tersedia.

Mekanisme kelongsoran di lokasi studi berhubungan dengan hujan. Analisis balik kestabilan lereng menunjukkan bahwa mekanisme longsor ini serupa dengan kejadian di lapangan. Mitigasi longsor di lokasi studi menunjukkan bahwa kombinasi metode pelandaian, pemasangan subdrain, dan paku tanah menunjukkan hasil yang baik serta memenuhi kriteria minimum FK pada kondisi statik dan gempa.

Sistem pemantauan berupa inklinometer diajukan untuk mengevaluasi kinerja mitigasi longsor dan alat peringatan dini kelongsoran. Nilai level dan kriteria pergerakan lereng diajukan pada kajian ini.

Metode kajian yang diusulkan dalam penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan praktis dengan mengintegrasikan identifikasi material, metode mitigasi perkuatan lereng, dan pemantauan kinerja perkuatan. Penggabungan aspek-aspek penting tersebut dalam sebuah kerangka kajian praktis masih relatif terbatas dalam literatur.

Kajian ini dikembangkan berdasarkan satu studi kasus sehingga masih memerlukan validasi pada lokasi tanah residual tropis lainnya. Selain itu, hasil analisis balik harus dipahami sebagai salah satu kombinasi parameter tanah representatif yang konsisten dengan data lapangan dan laboratorium, bukan sebagai solusi tunggal.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ini didukung oleh Program Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Inovasi (P2MI)-ITB 2026 dan PT. Hutama Karya (Persero). Segala temuan, pendapat, kesimpulan, dan rekomendasi dalam artikel ini adalah milik penulis dan tidak menggambarkan pandangan institusi pendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bishop, A. W. (1955). *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. *Géotechnique*, *5*(1), 7–17. https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7

Blight, G. E., & Leong, E. C. (Eds.). (2012). *Mechanics of Residual Soils* (2nd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12014

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), Landslides investigation and mitigation* (pp. 36–75). *Transportation Research Board, US National Research Council.*

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th ed.). Cengage Learning.

Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. (2002). Panduan Geoteknik 4: Timbunan Jalan pada Tanah Lunak (Pedoman Kimpraswil *No: Pt T-10-2002-B)*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.

Elahi, T. E., Islam, M. A., & Islam, M. S. (2022). *Parametric Assessment of Soil Nailing on the Stability of Slopes* Using Numerical Approach. *Geotechnics*, *2*(3), 615–634. https://doi.org/10.3390/geotechnics2030030

Fookes, P. G. (Ed.). (1997). *Tropical Residual Soils: A Geological Society Engineering Group Working Party Revised Report*. Geological Society of London.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118280492

Hakim, A. M., Rifan, M., & Sahadewa, A. (2025a). Analisis Perkuatan Soil Nailing Pada Lereng Sungai Ciliwung di Area Lapangan Tembak Kopassus Cijantung. Jurnal Mitra Teknik Sipil, *8*(3), 671–684. https://doi.org/10.24912/jmts.v8i3.32627

Hakim, A. M., Satria, T. W., & Sahadewa, A. (2025b). Studi Parametrik Analisis Kestabilan Lereng dengan Soil Nailing pada Sungai Ciliwung Area Bangunan Komplek Kopassus. Axial : Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi, 13(3), 290–296. https://doi.org/10.30742/axial.v13i3.5007

Iftikhar, A. A., & Artati, H. K. (2024). *Finite Element Modelling of Soil Nailing Inclination Effect on Slope Stability: Cibeureum Slope Case Study*. *Teknisia*, *29*(1), 14–23. https://doi.org/10.20885/teknisia.vol29.iss1.art2

International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides. (1995). A Suggested Method for Describing the Rate of Movement of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, *52*(1), 75–78. https://doi.org/10.1007/BF02602683

Janbu, N. (1954). *Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. European Conference on Stability of Earth Slopes*, 43–49.

Janbu, N. (1973). *Slope Stability Computations.* In R. C. Hirschfeld & S. J. Poulos (Eds.), *Embankment Dam Engineering: Casagrande Volume* (pp. 47–86). John Wiley and Sons.

Krisnanto, S. (2023). Pengantar Mekanika Tanah untuk Tanah Takjenuh. ITB Press.

Krisnanto, S., & Rahardjo, H. (2021). *Characteristics of Rainfall-Induced Slope Instability in Cisokan Region, Indonesia*. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, *53*(5), 210504. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.5.4

Krisnanto, S., Susila, E., Sahadewa, A., Nawir, H., Rismantojo, E., & Apriadi, D. (2022). *Introduction of unsaturated soil mechanics in Indonesia to improve the understanding on geotechnical engineering-related infrastructure problems*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012001. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012001

Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., & Berg, R. (2015). *Geotechnical Engineering Circular No. 7 Soil Nail Walls - Reference Manual*. *National Highway Institute U.S. Department of Transportation-Federal Highway Administration*.

Melhan, M., Dewangga, E., Satyanaga, A., Rahayu, W., Hamdany, A. H., Bahsan, E., Adiguna, G. A., Wijaya, M., Gofar, N., & Gumay, H. (2026). *Rainfall-induced stability of unsaturated tropical slopes in Pagar Alam, South Sumatra, Indonesia: Effects of slope gradient and soil layering*. *PLOS One*, *21*(8), e0354028. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0354028

Meng, G.-H., & Chu, J. (2011). *Shear Strength Properties of a Residual Soil in Singapore*. *Soils and Foundations*, *51*(4), 565–573. https://doi.org/10.3208/sandf.51.565

Mina, E., Sengara, I. W., & Krisnanto, S. (2025). *Unsaturated Soil Characteristics of Residual Soil in Indonesia*. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, *52*(9), 56–66. https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.52.9.5

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Géotechnique*, *15*(1), 79–93. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1967). *A Numerical Method for Solving the Equations of Stability of General Slip Surfaces. Computer Journal*, *9*, 388–393. https://doi.org/10.1093/comjnl/9.4.388

Morin, W. J., & Todor, P. C. (1975). *Laterite and Lateritic Soils and Other Problem Soils of the Tropics: An Engineering Evaluation and Highway Design Study for United States* (Vol. 2). U.S. Agency for International Development.

Nait-Rabah, O., Germain, F., Estevez, Y., Guiraud, J., Medjigbodo, G., Dias, D., & Maalouf, C. (2023). *Characterisation of Geotechnical Properties of Residual Tropical Soils Used for Road Infrastructure: French Guiana Experience*. *Applied Sciences*, *13*(13), 7943. https://doi.org/10.3390/app13137943

Okkels, N. (2019). *Modern Guidelines for Classification of Fine Soils*. *Proceedings*

of the XVII ECSMGE-2019 Geotechnical Engineering Foundation of the Future. https://doi.org/doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0651

Phan, T. T. T., & Gui, M. W. (2019*). Soil Nailing Behaviour for Slope Stabilization:* A Case Study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering GEOTROPIKA 2019*, *527*(1), 12037. https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012037

Public Works Research Institute. (2007). *Landslide Prevention Technical Guidelines*.

Salamah, M. D. L., Jitno, H., Lestari, I. F., Marsa, N. A. I., & Hanjani, A. (2026). *Characterization and Shear Strength Evaluation of Sensitive Volcanic Residual Soils in West Java*. *Indonesian Geotechnical Journal*, *5*(1), 31–42. https://doi.org/10.56144/igj.v5i1.144

Spencer, E. (1967). *A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces*. *Géotechnique*, *17*(1), 11–26. https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11

Standar Nasional Indonesia. (2017). Standar Nasional Indonesia (SNI) 8460: Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.

Van der Merwe, D. H. (1964). *The Prediction of Heave from the Plasticity Index and the Percentage Clay Fraction of Soils*. *The Civil Engineer in South Africa*, 103–107.

Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical Engineering in Residual Soils*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470943113

Wilson, M. J. (1999). *The Origin and Formation of Clay Minerals in Soils: Past, Present and Future Perspectives*. *Clay Minerals*, *34*(1), 7–25. https://doi.org/10.1180/000985599545957

Zhu, D. Y., Lee, C. F., Qian, Q. H., & Chen, G. R. (2005). *A Concise Algorithm for Computing the Factor of Safety using the Morgenstern-Price Method*. *Canadian Geotechnical Journal*, *42*(1), 272–278. https://doi.org/10.1139/t04-072