



KARAKTERISTIK GEOTEKNIK TANAH TERALTERASI HIDROTHERMAL PADA LERENG JALAN PONOROGO-PACITAN KM 226

Aulia Rizky Akbarrina^{1*}, M. Sufyan Tsaury¹, Edwin Octavianto Saputra¹, Zikra Fauzan Virawan¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Lamongan Kecamatan Lamongan, Jawa Timur

*auliarizky02@umla.ac.id

ABSTRACT

The slope along the Ponorogo–Pacitan Road at KM 226, East Java, has repeatedly experienced landslides due to hydrothermal alteration processes that have weakened the volcanic rock mass of which it is composed. This study characterised the geotechnical properties of five altered soil layers through laboratory testing (moisture content, unit weight, Atterberg limits and direct shear) and analysed slope stability using the Limit Equilibrium Method. The results show that the middle clay layer of the slope is classified as CL with a low to moderate plasticity index ($PI = 12.78\text{--}15.00\%$), indicating a predominance of kaolinite/illite clay minerals over smectite. As saturated shear strength testing could not be carried out due to the site being inaccessible during the rainy season (landslide-prone area), the saturated shear strength parameters were estimated using a conservative approach of 2/3 of the dry conditions. The analysis yielded Safety Factors (SF) for the undrained condition ranging from 0.941 to 1.102, below the SNI safety threshold (1.25), and decreasing to 0.609–0.726 in the saturated simulation. A sensitivity analysis of the ratio (0.5–0.8) confirmed that the critical slope conditions were consistent across all scenarios, and were therefore not dependent on a single assumed value.

Keywords: hydrothermal alteration; soil shear strength; slope safety factor; plasticity index

ABSTRAK

Lereng pada ruas Jalan Ponorogo-Pacitan KM 226, Jawa Timur, secara berulang mengalami kelongsoran akibat proses alterasi hidrotermal yang melemahkan massa batuan vulkanik penyusunnya. Penelitian ini mengkarakterisasi sifat geoteknik lima lapisan tanah teralterasi melalui pengujian laboratorium (kadar air, berat isi, batas Atterberg, dan geser langsung) serta menganalisis stabilitas lereng menggunakan Metode Kesetimbangan Batas. Hasil menunjukkan lapisan lempung tengah lereng diklasifikasikan sebagai CL dengan indeks plastisitas rendah hingga sedang ($PI = 12,78\text{--}15,00\%$), mengindikasikan dominasi mineral lempung kaolinit/illit dibandingkan smektit. Karena pengujian kuat geser kondisi jenuh tidak dapat dilakukan akibat penutupan akses lokasi pada musim hujan (kawasan rawan longsor), parameter kuat geser jenuh diestimasi menggunakan pendekatan konservatif rasio 2/3 dari kondisi kering. Analisis menghasilkan nilai Faktor Keamanan (FK) kondisi asli sebesar 0,941–1,102, di bawah ambang aman (1,25), dan menurun hingga 0,609–0,726 pada simulasi jenuh. Analisis sensitivitas rasio (0,5–0,8) menegaskan bahwa kondisi kritis lereng konsisten pada seluruh skenario, sehingga tidak bergantung pada satu nilai asumsi tunggal.

Kata Kunci: alterasi hidrotermal; kuat geser tanah; faktor keamanan lereng; indeks plastisitas

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang dilingkari oleh jalur gunungapi aktif, menjadikannya salah satu wilayah dengan intensitas kejadian tanah longsor tertinggi di dunia. Kerentanan tersebut tidak semata-mata diakibatkan oleh faktor topografi dan curah hujan tinggi, melainkan juga oleh warisan geologi berupa batuan vulkanik yang telah mengalami modifikasi kimia dan mineralogi intensif sepanjang jutaan tahun. Alterasi hidrotermal, sebagai salah satu

proses geologi pascavulkanik yang paling berpengaruh, mengubah komposisi mineral batuan asal dan secara drastis mengurangi kekuatan massanya [1].

Lereng pada ruas Jalan Ponorogo-Pacitan KM 226 di Kabupaten Pacitan, Jawa Timur, merupakan manifestasi nyata dari dampak geoteknik alterasi hidrotermal. Berdasarkan penelitian terdahulu oleh [2], batuan di lokasi ini diklasifikasikan sebagai weak rock dengan kisaran nilai Unconfined Compressive Strength (UCS) antara 1 hingga 25 MPa. Degradasi kekuatan ini terutama disebabkan oleh pembentukan mineral lempung sekunder dalam jaringan rekahan dan porositas batuan induk. Pada saat musim hujan, mineral lempung tersebut menyerap air dalam volume besar, membangun tekanan pori yang berlebih, dan pada akhirnya memicu keruntuhan lereng yang berulang kali mengganggu aksesibilitas jalan nasional tersebut.

Pemahaman mendalam mengenai karakteristik geoteknik tanah teralterasi menjadi fondasi yang tidak dapat diabaikan dalam perancangan sistem mitigasi lereng yang efektif. Serangkaian penelitian dari berbagai wilayah vulkanik di Indonesia di Pegunungan Selatan Lombok dan di kawasan Pacitan, secara konsisten menunjukkan korelasi kuat antara tipe mineralogi hasil alterasi dan tingkat kerentanan lereng [3][4]. Namun demikian, karakterisasi geoteknik yang spesifik untuk lereng KM 226 Jalan Ponorogo-Pacitan belum pernah dilaporkan secara komprehensif dalam literatur ilmiah. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui program pengujian laboratorium yang sistematis, dengan tujuan: (1) mengidentifikasi profil fisik dan mekanik lapisan tanah teralterasi, (2) menentukan klasifikasi tanah berdasarkan sistem USCS, (3) menganalisis degradasi parameter kuat geser akibat peningkatan kadar air, dan (4) menelaah implikasi karakteristik mineralogi terhadap potensi instabilitas lereng.

Mekanisme dan Produk Alterasi Hidrotermal

Alterasi hidrotermal merupakan proses fisikokimia yang terjadi ketika batuan induk berinteraksi dengan larutan berair bertemperatur tinggi yang mengandung ion-ion aktif. Fluida hidrotermal umumnya bersumber dari air meteorik yang bersirkulasi ke dalam kerak bumi dan terpanaskan oleh aktivitas magmatik, atau dari fluida magmatik itu sendiri yang dilepaskan saat intrusi mendingin. Reaksi antara fluida dan mineral batuan induk menghasilkan mineral-mineral sekunder yang lebih stabil pada kondisi suhu dan tekanan rendah [5].

Jenis mineral yang terbentuk bergantung pada kondisi termodinamika sistem. Pada rentang suhu rendah (di bawah 150°C), mineral smektit golongan montmorilonit mendominasi produk alterasi. Smektit dicirikan oleh struktur lapis 2:1 dengan kapasitas pertukaran kation (CEC) sangat tinggi dan kemampuan mengabsorpsi air dalam jumlah besar di antara lapisan kristalnya, sehingga menghasilkan potensi swelling yang ekstrem. Pada suhu menengah dan kondisi pH lebih asam, kaolinit dengan struktur lapis 1:1 dan plastisitas lebih rendah menjadi produk dominan. Mineral ilit, yang berstruktur lapis 2:1 namun dengan kation kalium mengunci lapisan kristal, terbentuk pada kondisi intermediet dan memiliki sifat lebih stabil dibandingkan smektit [6].

Di kawasan Pegunungan Selatan Jawa, alterasi propilitik dan argilik merupakan tipe yang paling umum dijumpai. Alterasi propilitik menghasilkan mineral klorit, epidot, dan kalsit yang secara geoteknik relatif lebih stabil. Sebaliknya, alterasi argilik intermediet hingga lanjut menghasilkan dominasi mineral lempung seperti ilit, smektit, dan kaolinit yang bersifat lemah dan sensitif terhadap air. Kehadiran mineral-mineral tersebut dalam massa lereng secara langsung menentukan respons mekanik lereng terhadap berbagai kondisi pembebanan dan hidrologi.

Parameter Geoteknik Tanah Lempung dan Sistem Klasifikasi

Sifat geoteknik tanah lempung erat kaitannya dengan komposisi mineral dan interaksinya dengan air. Batas-batas Atterberg merupakan parameter indeks fundamental yang mendeskripsikan rentang konsistensi tanah berbutir halus. Batas cair (Liquid Limit, LL) mencerminkan kadar air di mana tanah berada pada batas antara kondisi plastis dan cair, sedangkan batas plastis (Plastic Limit, PL) merupakan kadar air minimum di mana tanah masih dapat dideformasi secara plastis tanpa retak. Indeks plastisitas (Plasticity Index, $PI = LL - PL$) mencerminkan rentang kadar air di mana tanah berperilaku plastis dan berkorelasi langsung dengan kandungan dan jenis mineral lempung [7].

Konsep aktivitas tanah yang diperkenalkan Skempton memberikan cara kuantitatif untuk mengidentifikasi jenis mineral lempung dominan. Aktivitas (A_c) didefinisikan sebagai rasio antara indeks plastisitas dengan persentase fraksi lempung berukuran kurang dari 2 mikron. Nilai $A_c < 0,75$ mengindikasikan dominasi mineral kaolinit, nilai $0,75 \leq A_c \leq 1,25$ menunjukkan dominasi illit, dan nilai $A_c > 1,25$ mengindikasikan dominasi smektit atau montmorilonit [8]. Identifikasi mineral lempung dominan penting karena tiap jenis mineral memiliki karakteristik pengembangan dan penurunan kekuatan yang berbeda ketika berinteraksi dengan air.

Sistem Unified Soil Classification System (USCS) mengklasifikasikan tanah berbutir halus berdasarkan nilai LL dan PI yang diplot pada Bagan Plastisitas Casagrande. Tanah dengan $LL < 50\%$ dan berada di atas garis A ($PI > 0,73(LL - 20)$) diklasifikasikan sebagai CL (lempung plastisitas rendah), sedangkan yang berada di bawah garis A sebagai ML (lanau plastisitas rendah). Klasifikasi ini memiliki implikasi praktis dalam perancangan geoteknik karena mencerminkan perkiraan perilaku tanah dalam berbagai kondisi pembebanan dan kadar air.

Degradasi Kuat Geser Tanah Akibat Variasi Kadar Air

Kuat geser tanah yang dirumuskan melalui kriteria Mohr-Coulomb dikendalikan oleh dua parameter utama, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Pada tanah lempung, kedua parameter ini sangat dipengaruhi oleh kadar air. Peningkatan kadar air menyebabkan difusi lapisan air terikat (double diffuse layer) di sekitar partikel lempung semakin tebal, sehingga jarak antar partikel meningkat dan gaya tarik-menarik van der Waals antar partikel melemah. Akibatnya, kohesi menurun dan sudut geser dalam berkurang [9].

Pada lereng alami yang mengalami infiltrasi hujan, fenomena ini diperparah oleh pembangunan tekanan air pori berlebih (excess pore water pressure) yang mengurangi tegangan efektif. Penurunan tegangan efektif secara langsung menurunkan gaya normal pada bidang potensial gelincir, yang pada akhirnya menurunkan kapasitas tahanan geser lereng. Tanah mengandung smektit menunjukkan tekanan pengembangan (swelling pressure) yang signifikan dan penurunan sudut geser dalam yang drastis saat jenuh, menjadikannya sangat rentan terhadap keruntuhan lereng pada kondisi hujan lebat [10].

2. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian dan Karakteristik Geologi

Lokasi penelitian berada pada koordinat geografis $111^{\circ}22'14,39''$ Bujur Timur dan $08^{\circ}01'14,73''$ Lintang Selatan, tepatnya pada titik KM 226 ruas Jalan Ponorogo-Pacitan yang melintas dari Kecamatan Slahung di Kabupaten Ponorogo menuju Kecamatan Arjosari di Kabupaten Pacitan,

Jawa Timur. Secara geologi regional, kawasan ini termasuk dalam Formasi Jaten yang tersusun atas batu pasir tufan, batu lempung, batu lanau, dan tuff berumur Miosen Tengah hingga Akhir [11]. Posisi lereng berada pada zona interferensi antara aktivitas vulkanik purba dan proses hidrotermal yang berlangsung secara berulang selama jutaan tahun, menghasilkan derajat alterasi batuan yang tinggi di sebagian besar profil tanah hingga kedalaman lebih dari 30 meter.

Berdasarkan hasil penyelidikan geolistrik yang dilakukan dengan metode Vertical Electrical Sounding (VES) pada empat titik pengukuran, profil lapisan bawah permukaan lereng dapat dibagi menjadi empat satuan:

1. lapisan lempung berpasir tipis di permukaan
2. lempung berselang-seling pasir pada kedalaman 0–30 m
3. lapisan tuff pada kedalaman 30–60 m
4. lava padat pada kedalaman 60–80 m.

Lapisan lempung pada kedalaman 0–30 m merupakan zona paling kritis karena permeabilitas rendahnya menahan air hujan yang terinfiltrasi dan menyebabkan peningkatan tekanan pori secara signifikan selama musim hujan.

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel tanah tidak terganggu (undisturbed sample) dilakukan menggunakan tabung Shelby berdiameter 76 mm yang ditekan secara perlahan untuk meminimalkan gangguan struktur tanah asli. Sampel dikumpulkan dari lima lapisan yang teridentifikasi, yaitu: lapisan penutup (pasir, lanau, dan kerikil); lapisan lempung tengah lereng; lapisan lempung jenuh air; lapisan tuff bagian bawah lereng; dan lapisan lava. Setelah pengambilan, sampel diangkut ke laboratorium dalam kondisi tertutup menggunakan plastik kedap udara dan lilin parafin untuk mencegah perubahan kadar air selama transportasi. Pengujian dilaksanakan dalam waktu tidak lebih dari 48 jam setelah pengambilan sampel guna menjaga representativitas kondisi lapangan.

Pengujian Laboratorium

Seluruh pengujian mengacu pada standar American Society for Testing and Materials (ASTM) dan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku, dan dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Brawijaya Malang. Rangkaian pengujian mencakup:

1. Pengujian kadar air alami menggunakan metode oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ selama 24 jam (ASTM D2216).
2. Pengujian berat isi tanah (density test) menggunakan tabung sampel bervolume diketahui (ASTM D7263) untuk mendapatkan unit weight basah dan kering.
3. Pengujian berat jenis butiran (G_s) menggunakan metode piknometer dengan aquades (ASTM D854).
4. Analisa ukuran butir melalui pengayakan basah dan kering untuk tanah berbutir kasar, serta uji hidrometer (ASTM D422) untuk fraksi lempung dan lanau.
5. Pengujian batas Atterberg menggunakan alat Casagrande untuk batas cair (LL) dan metode rol tangan untuk batas plastis (PL) sesuai ASTM D4318.
6. Pengujian geser langsung (direct shear test) pada tiga variasi tegangan normal (50, 100, 150 kPa) untuk mendapatkan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) sesuai ASTM D3080.

Pengujian kuat geser pada kondisi jenuh tidak dapat dilakukan pada penelitian ini karena lokasi penelitian saat kondisi hujan merupakan lokasi yang rawan longsor sehingga saat kondisi hujan

daerah lokasi penelitian ditutup untuk menghindari adanya korban jiwa. Sebagai pendekatan konservatif, nilai kuat geser kondisi jenuh diasumsikan sebesar $2/3$ kohesi (c') dan $2/3$ sudut geser (ϕ') kondisi kering yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium. Asumsi ini digunakan sebagai pendekatan praktis (engineering judgment) untuk mengakomodasi potensi penurunan kuat geser akibat peningkatan tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif pada kondisi jenuh (Terzaghi's effective stress principle), mengingat kondisi jenuh secara umum menghasilkan nilai kuat geser yang lebih rendah dibandingkan kondisi kering akibat berkurangnya kohesi dan sudut geser dalam.

Analisis Stabilitas Lereng

Pada perhitungan stabilisasi lereng menggunakan Geostudio 2018 Slope/W. Stabilisasi lereng diperhitungkan dengan kondisi asli (kermarau kering) dan kondisi bidang gelincir jenuh air. Asumsi parameter kuat geser tanah kondisi jenuh yaitu pada pengujian kuat geser tanah dilakukan pada kondisi kering di laboratorium menggunakan uji geser langsung (*direct shear test*), sehingga diperoleh nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) pada kondisi tersebut. Pengujian kuat geser pada kondisi jenuh tidak dapat dilaksanakan dalam penelitian ini karena sampel saat kondisi jenuh tidak bisa didapatkan. Saat musim hujan lokasi penelitian rawan longsor sehingga pada saat hujan daerah lokasi penelitian ditutup untuk menghindari adanya korban jiwa. Untuk data (c') dan sudut geser dalam (ϕ') pada kondisi jenuh menggunakan pendekatan praktis (engineering judgment). Pendekatan ini didasarkan pada prinsip tegangan efektif Terzaghi, di mana peningkatan derajat kejenuhan menyebabkan kenaikan tekanan air pori (u), sehingga tegangan efektif ($\sigma' = \sigma - u$) dan kuat geser tanah ($\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$) mengalami penurunan [12-13]. Rasio $2/3$ digunakan sebagai nilai estimasi konservatif untuk merepresentasikan potensi penurunan kuat geser akibat saturasi, mengingat data pengujian aktual pada kondisi jenuh tidak tersedia pada penelitian ini. Asumsi ini merupakan salah satu keterbatasan penelitian dan dibahas lebih lanjut pada bagian keterbatasan penelitian.

Permodelan lapisan tanah disesuaikan dengan hasil penyelidikan geometri, geolistrik dan pengujian di laboratorium. Perhitungan dengan metode kesetimbangan batas dan metode Morgenstern-Price. Geometri hasil QGIS dan Autocad dan parameter tanah diinput.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Fisik dan Indeks Tanah

Karakteristik fisik kelima lapisan tanah yang teridentifikasi pada lereng KM 226 disajikan pada Tabel 1. Lapisan penutup yang tersusun atas pasir, lanau, dan kerikil menunjukkan berat isi sebesar $19,97 \text{ kN/m}^3$ dan bersifat non-plastis berdasarkan uji Atterberg, sehingga diklasifikasikan sebagai SM/GC dalam sistem USCS. Lapisan lempung tengah lereng merupakan lapisan paling signifikan dalam konteks stabilitas, dengan berat isi yang lebih rendah yaitu $16,04 \text{ kN/m}^3$ yang mengindikasikan kandungan pori dan kadar air yang relatif tinggi.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Indeks Tanah Lapisan Lereng KM 226

Lapisan Tanah	γ (kN/m^3)	Gs	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Klasifikasi USCS
Penutup (Pasir-Lanau-Kerikil)	19,97	2,62	Non- Plastis	-	-	SM/GC

Lempung Tengah Lereng	16,04	2,65	33,34	20,34	13,00	CL
Lempung Jenuh Air	19,05	2,67	31,38	16,38	15,00	CL
Tuff Bawah Lereng	17,60	2,58	38,12	25,34	12,78	CL-ML
Lava (Drastic)	20,00	2,70	-	-	-	Batuan

Lapisan lempung tengah lereng dengan LL = 33,34%, PL = 20,34%, dan PI = 13,00% diklasifikasikan sebagai CL berdasarkan Bagan Plastisitas Casagrande, yaitu lempung plastisitas rendah. Indeks plastisitas sebesar 13% mengindikasikan rentang kadar air yang cukup sempit di mana tanah bersifat plastis, yang berarti tanah ini relatif sensitif terhadap perubahan kadar air kecil sekalipun. Kadar air alami yang terukur pada lapisan ini mencapai 28–35%, berada di dekat atau di atas batas plastisnya, menandakan bahwa lapisan tersebut telah berada dalam kondisi mendekati atau melampaui batas kestabilan plastisnya pada kondisi lapangan.

Lapisan lempung jenuh air (lapisan ketiga) menunjukkan nilai LL sedikit lebih rendah (31,38%) namun PI lebih tinggi (15,00%), mengindikasikan komposisi mineral lempung yang sedikit berbeda dengan lapisan di atasnya. Lapisan tuff bawah lereng menunjukkan nilai LL lebih tinggi (38,12%) dengan PI = 12,78%, masuk dalam kelompok CL-ML yang mencerminkan transisi antara lempung dan lanau plastisitas rendah. Perbedaan karakteristik antar lapisan ini mencerminkan variasi intensitas alterasi hidrotermal yang berkurang secara gradual dengan kedalaman seiring menjauh dari zona sumber fluida hidrotermal.

Untuk mengevaluasi konsistensi karakteristik plastisitas material hasil alterasi hidrotermal pada penelitian ini, hasil pengujian Atterberg limit dibandingkan dengan dua studi kasus alterasi hidrotermal pada batuan vulkanik dan zona argilik lainnya, yaitu studi pada breksi andesit teralterasi hidrotermal di Sierra de Angangueo, Meksiko [14], dan studi pada zona argilik terowongan tambang bawah tanah Ciurug, Pongkor, Jawa Barat [15].

Tabel 2. Perbandingan Nilai Atterberg Limit

Sampel	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Klasifikasi USCS	Mineral Lempung Dominan
Pacitan — Lempung Tengah Lereng	33,34	20,34	13,00	CL	
Pacitan — Lempung Jenuh Air	31,38	16,38	15,00	CL	
Pacitan — Tuff Bawah Lereng	38,12	25,34	12,78	CL-ML	
Angangueo, Meksiko — Breksi andesit sampel 1	97,91	48,53	49,37	MH	Kaolinite, sericite
Angangueo, Meksiko — Breksi andesit sampel 2	37,67	30,58	7,08	SM	Kaolinite, sericite
Pongkor, Jawa Barat — XC 662	66,76	33,42	33,37	MH	Montmorillonite, saponite, beidellite, halloysite
Pongkor, Jawa Barat — XC 6-1a	46,16	28,52	17,64	ML	Kaolinite, vermiculite

Nilai indeks plastisitas (PI) pada lapisan lempung tengah lereng penelitian ini (PI = 13,00%) tergolong relatif rendah dibandingkan dengan nilai PI pada breksi andesit teralterasi di Angangueo, yang mencapai 49,37% pada salah satu sampelnya dan diklasifikasikan sebagai lanau kompresibilitas-tinggi (MH). Perbedaan yang mencolok ini kemungkinan besar disebabkan oleh

perbedaan intensitas alterasi hidrotermal serta jenis mineral lempung sekunder yang terbentuk. Pada sampel Angangueo dengan PI tinggi, kandungan lempung dan mika (termasuk kaolinite dan sericite) yang lebih dominan dan homogen dalam matriks batuan menghasilkan plastisitas yang jauh lebih tinggi, sementara pada penelitian ini komposisi mineral lempung yang terbentuk cenderung menghasilkan plastisitas rendah hingga sedang (CL, CL-ML).

Pola serupa juga teramati pada perbandingan dengan hasil studi zona argilik Pongkor, di mana nilai PI pada bukaan XC 662 mencapai 33,34% (diklasifikasikan sebagai lanau plastisitas tinggi, MH) akibat kehadiran mineral lempung reaktif dari kelompok smektit (montmorillonite, saponite, beidellite). Sebaliknya, pada bukaan XC 6-1a dengan distribusi mineral lempung yang lebih merata namun didominasi oleh kaolinite dan vermiculite yang kurang reaktif terhadap air, nilai PI menjadi lebih rendah (17,64%) meskipun intensitas argilitisasinya justru lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa nilai plastisitas tanah hasil alterasi hidrotermal tidak semata-mata ditentukan oleh intensitas atau tingkat alterasi, melainkan sangat dipengaruhi oleh jenis mineral lempung sekunder yang terbentuk — di mana kehadiran mineral kelompok smektit (aktif dan ekspansif) menghasilkan plastisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan kaolinite atau illite (kurang aktif) pada tingkat alterasi yang setara.

Merujuk pada pola ini, nilai PI yang relatif rendah pada seluruh lapisan penelitian ini (12,78–15,00%) mengindikasikan bahwa mineral lempung sekunder yang terbentuk kemungkinan besar didominasi oleh kelompok kaolinite atau illite.

Parameter Kuat Geser: Kondisi Asli dan Simulasi Kondisi Jenuh

Hasil pengujian direct shear untuk seluruh lapisan tanah disajikan pada Tabel 3. Lapisan lempung tengah lereng, sebagai elemen paling kritis dalam sistem geoteknik lereng KM 226, memperlihatkan nilai kohesi $c = 33,34$ kPa dan sudut geser dalam $\phi = 13^\circ$ pada kondisi asli. Nilai kohesi ini tergolong sedang untuk kelas lempung plastisitas rendah, namun sudut geser dalam yang hanya 13° menunjukkan bahwa friksi antar partikel sangat terbatas, kemungkinan akibat permukaan mineral lempung yang halus dan berlubang (platy surface) yang tidak menghasilkan gesekan mekanik yang signifikan.

Tabel 3. Parameter Kuat Geser Seluruh Lapisan Tanah: Kondisi Asli vs. Kondisi Jenuh (Basah)

Lapisan Tanah	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)
Penutup (Pasir-Lanau-Kerikil)	19,97	22,55	22	15,03	14,67	20.000
Lempung Tengah Lereng	16,04	33,34	13	22,23	8,67	30.000
Lempung Jenuh Air	19,05	31,38	15	20,92	10,00	25.000
Tuff Bawah Lereng	17,60	90,00	38	60,00	25,33	40.000
Lava (Drastic)	20,00	100,00	50	66,67	33,33	50.000

Penerapan faktor reduksi 2/3 untuk memodelkan simulasi pada kondisi jenuh menghasilkan penurunan parameter kuat geser yang cukup signifikan. Pada lapisan lempung tengah lereng, kohesi turun dari 33,34 kPa menjadi $c' = 22,23$ kPa (penurunan 11,11 kPa atau 33,33%), sedangkan sudut geser dalam turun dari 13° menjadi $\phi' = 8,67^\circ$ (penurunan $4,33^\circ$ atau 33,33%). Meskipun menggunakan pendekatan empiris, faktor reduksi ini telah diverifikasi kesesuaiannya dengan kondisi lapangan melalui perbandingan antara nilai faktor keamanan hasil perhitungan dan observasi kejadian longsor yang tercatat di lokasi penelitian.

Hubungan Profil Fisik dan Indeks Tanah terhadap Faktor Keamanan Lereng

Kondisi kadar air alami lapisan lempung tengah lereng yang telah berada pada kisaran 28–35% mendekati atau melampaui batas plastisnya ($PL = 20,34\%$) — tanah ini telah berada pada kondisi mendekati ambang batas kestabilan plastisnya. Pada kondisi ini, penambahan kadar air relatif kecil sekalipun, misalnya akibat infiltrasi air hujan musiman, berpotensi mendorong tanah melewati batas cairnya ($LL = 33,34\%$) atau setidaknya menurunkan kuat gesernya secara signifikan melalui mekanisme peningkatan tekanan air pori, meskipun tanpa disertai pembentukan rekahan ekspansif yang mencolok seperti pada tanah bermineral smektit.

Pada studi sampel tanah di Angangueo, Meksiko turut memperkuat argumen ini dari sisi mekanik: meskipun studi tersebut, penurunan kuat tekan uniaksial yang ekstrem pada breksi andesit teralterasi dari 36,26 MPa pada kondisi segar menjadi hanya 0,47 MPa pada kondisi teralterasi dan basah, jika nilai *Unconfined Compressive Strength* (UCS) atau q_u kecil, maka kuat geser tanah (khususnya untuk tanah lempung jenuh) juga akan kecil [16]. Hal ini menunjukkan bahwa kerentanan terhadap kelongsoran akibat saturasi air tidak hanya ditentukan oleh jenis mineral lempung semata, tetapi juga oleh tekstur, porositas, dan derajat homogenitas alterasi pada massa tanah/batuan.

Nilai plastisitas rendah hingga sedang ($PI = 12,78\text{--}15,00\%$) pada seluruh lapisan penelitian ini mengindikasikan dominasi mineral lempung kaolinite atau illite, berbeda dengan tanah bermineral smektit/montmorillonite yang bersifat lebih ekspansif terhadap perubahan kadar air. Meskipun demikian, kadar air alami pada lapisan lempung tengah lereng (28–35%) telah berada mendekati atau melampaui batas plastisnya ($PL = 20,34\%$), menunjukkan bahwa tanah ini telah berada pada kondisi mendekati ambang batas kestabilan plastis di lapangan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan kadar air relatif kecil, misalnya melalui infiltrasi air hujan musiman, berpotensi menurunkan kuat geser tanah secara signifikan melalui mekanisme peningkatan tekanan air pori dan penurunan tegangan efektif (Terzaghi), sehingga meningkatkan risiko kelongsoran pada lereng penelitian, terutama pada musim hujan.

Pengaruh Perubahan Parameter Kohesi dan Sudut Geser terhadap Nilai Faktor Keamanan Lereng

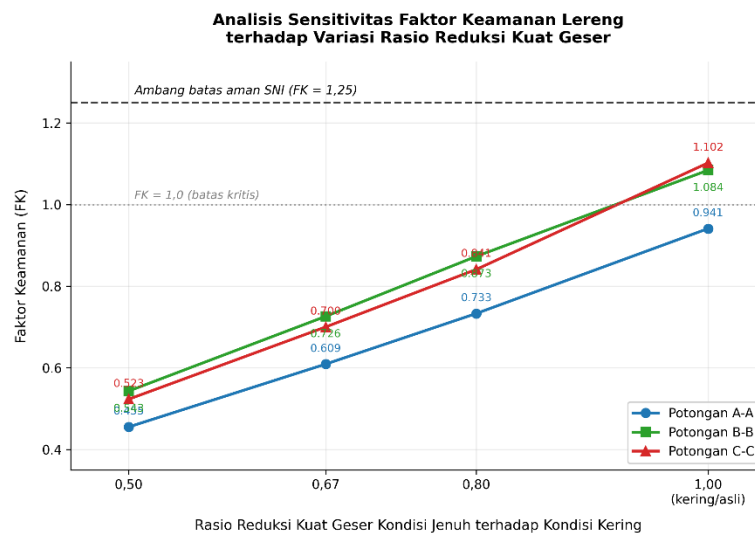
Penurunan parameter kuat geser memiliki konsekuensi langsung terhadap faktor keamanan (FK) lereng. Menggunakan persamaan Mohr-Coulomb sebagai kerangka analitis, kuat geser tersedia (τ) pada suatu titik di bidang gelincir dinyatakan sebagai $\tau = c + \sigma \tan \phi$. Penurunan c sebesar 33% hasil dari pendekatan praktis (engineering judgment) pada simulasi kondisi jenuh dikombinasikan dengan penurunan $\tan \phi$ (dari $\tan 13^\circ = 0,231$ menjadi $\tan 8,67^\circ = 0,152$, atau penurunan sekitar 34%) menghasilkan pengurangan kapasitas tahanan geser yang sangat signifikan pada bidang gelincir.

Analisis stabilitas lereng menggunakan Metode Kesenjangan Batas (LEM) dengan perangkat lunak yang menggunakan parameter geoteknik dari penelitian ini menghasilkan nilai FK 0,941 (potongan A-A), 1,084 (B-B), dan 1,102 (C-C) pada kondisi asli. Ketiganya berada di bawah ambang batas aman 1,25 yang dipersyaratkan SNI untuk lereng jalan sementara. Pada simulasi kondisi basah, nilai FK mengalami penurunan rata-rata 35% menjadi 0,609 (A-A), 0,726 (B-B), dan 0,700 (C-C) [17].

Tabel 4. Nilai Faktor Keamanan pada Berbagai Skenario Rasio Reduksi Kuat Geser Kondisi Jenuh

Potongan Lereng	Angka Keamanan			Keterangan
	0,5	2/3	0,8	
A-A	0,455	0,609	0,733	< 1,25 (Tidak Aman)
B-B	0,543	0,726	0,873	< 1,25 (Tidak Aman)
C-C	0,523	0,700	0,841	< 1,25 (Tidak Aman)

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa nilai Faktor Keamanan (FK) pada seluruh potongan lereng bersifat sensitif terhadap rasio reduksi kuat geser yang digunakan, dengan pola peningkatan FK secara konsisten seiring bertambahnya rasio dari 0,5 hingga 0,8. Pada potongan A-A, FK meningkat dari 0,455 (rasio 0,5) menjadi 0,733 (rasio 0,8); pada B-B dari 0,543 menjadi 0,873; dan pada C-C dari 0,523 menjadi 0,841.

**Gambar 1.** Grafik Analisis Sensitivitas Pengaruh Perubahan Nilai c dan ϕ Terhadap Nilai FK

Meskipun terdapat variasi nilai FK yang cukup besar antar-skenario (rentang $\pm 0,15-0,18$), seluruh nilai FK pada rentang rasio yang diuji tetap berada di bawah ambang batas aman ($FK = 1,25$), bahkan pada skenario rasio paling konservatif tinggi (0,8) sekalipun. Hal ini menunjukkan bahwa kesimpulan mengenai kondisi kritis lereng pada penelitian ini kokoh terhadap ketidakpastian nilai rasio reduksi kuat geser yang digunakan, sehingga validitas temuan tidak semata-mata bergantung pada satu asumsi rasio 2/3 saja.

Perlu ditegaskan bahwa nilai FK pada kondisi jenuh air dalam penelitian ini merupakan hasil simulasi berbasis asumsi (engineering judgment), bukan hasil analisis dari data pengujian kuat geser aktual pada kondisi jenuh di laboratorium. Parameter kuat geser jenuh diperoleh melalui pendekatan reduksi empiris (rasio 2/3 dari kondisi kering) akibat keterbatasan akses lokasi penelitian pada musim hujan. Dengan demikian, nilai FK kondisi jenuh yang dilaporkan bersifat estimatif dan berfungsi sebagai indikasi kecenderungan (trend) penurunan kestabilan lereng, bukan nilai definitif yang merepresentasikan kondisi jenuh aktual di lapangan. Mengingat tingginya curah hujan tahunan di kawasan Pacitan (± 2.000 mm/tahun dengan intensitas puncak >100 mm/hari), serta relevansi praktis temuan ini terhadap potensi keruntuhan lereng dalam

waktu kurang dari 24 jam pada kondisi hujan ekstrem, penelitian lanjutan dengan pengujian kuat geser jenuh secara langsung sangat diperlukan untuk memvalidasi dan mengoreksi nilai FK simulasi ini, guna mendukung perumusan rekomendasi mitigasi yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini secara sistematis mengkarakterisasi sifat geoteknik tanah teralterasi hidrotermal pada lereng Jalan Ponorogo-Pacitan KM 226. Beberapa temuan utama adalah sebagai berikut:

- a. Nilai indeks plastisitas pada seluruh lapisan penelitian ini tergolong rendah hingga sedang ($PI = 12,78\text{--}15,00\%$), lebih rendah dibandingkan material teralterasi hidrotermal pada studi kasus lain seperti breksi andesit di Angangueo, Meksiko (PI hingga $49,37\%$) dan zona argilik Pongkor, Jawa Barat (PI hingga $33,34\%$). Hal ini mengindikasikan bahwa mineral lempung sekunder pada lokasi penelitian didominasi oleh kaolinite atau illite, bukan smektit/montmorillonite. Temuan ini menegaskan bahwa tingkat plastisitas tanah hasil alterasi hidrotermal lebih dipengaruhi oleh jenis mineral lempung yang terbentuk dibandingkan intensitas alterasinya.
- b. Analisis stabilitas lereng menunjukkan nilai FK kondisi asli sebesar $0,941\text{--}1,102$, berada di bawah ambang batas aman SNI ($1,25$), dan menurun rata-rata 35% pada simulasi kondisi jenuh ($FK\ 0,609\text{--}0,726$) akibat reduksi kuat geser dan peningkatan bobot unit tanah jenuh. Nilai FK kondisi jenuh ini merupakan hasil simulasi berbasis asumsi (engineering judgment) menggunakan pendekatan reduksi kuat geser $2/3$, bukan hasil pengujian aktual, sehingga bersifat indikatif terhadap kecenderungan penurunan kestabilan lereng. Mengingat tingginya curah hujan di kawasan Pacitan
- c. Analisis sensitivitas dengan variasi rasio reduksi kuat geser ($0,5\text{--}0,8$) menunjukkan bahwa nilai FK pada seluruh potongan lereng tetap berada di bawah ambang batas aman ($1,25$) pada seluruh skenario yang diuji, mengindikasikan bahwa kesimpulan kondisi kritis lereng bersifat kokoh dan tidak bergantung pada satu nilai asumsi rasio tunggal.
- d. Meskipun tanah hasil alterasi hidrotermal pada lokasi penelitian menunjukkan tingkat plastisitas yang tergolong rendah hingga sedang ($PI = 12,78\text{--}15,00\%$), yang mengindikasikan dominasi mineral lempung dengan aktivitas rendah seperti kaolinit dan illit, kondisi ini tidak serta-merta menjamin kestabilan lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa lereng penelitian berada pada kondisi kritis dengan nilai Faktor Keamanan di bawah ambang batas aman SNI ($0,941\text{--}1,102$) bahkan pada kondisi tanah asli, dan berpotensi mengalami penurunan hingga 35% pada simulasi kondisi jenuh air ($FK = 0,609\text{--}0,726$). Temuan ini mengindikasikan bahwa penurunan kuat geser akibat saturasi air merupakan faktor pengendali utama terhadap potensi kelongsoran pada material hasil alterasi hidrotermal, terlepas dari rendahnya tingkat plastisitas dan aktivitas mineral lempung yang menyusunnya.

5. SARAN

Salah satu keterbatasan utama penelitian ini adalah tidak tersedianya data pengujian kuat geser langsung pada kondisi jenuh air, sehingga nilai kuat geser jenuh diestimasi menggunakan pendekatan empiris berupa rasio konservatif sebesar $2/3$ dari nilai kuat geser kondisi kering. Keterbatasan ini disebabkan oleh penutupan akses menuju lokasi penelitian pada musim hujan, mengingat daerah tersebut merupakan kawasan rawan longsor sehingga ditutup oleh pihak berwenang sebagai langkah mitigasi untuk menghindari potensi korban jiwa. Kondisi ini menyebabkan pengambilan sampel dan pengujian tidak dapat dilakukan pada kondisi tanah yang benar-benar jenuh air sebagaimana terjadi di lapangan saat musim hujan. Oleh karena itu, nilai kuat geser kondisi jenuh yang digunakan dalam penelitian ini bersifat estimatif berdasarkan asumsi praktis (engineering judgment), bukan hasil pengujian langsung yang merepresentasikan kondisi aktual di lapangan. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian kuat geser

langsung pada kondisi jenuh air apabila akses ke lokasi memungkinkan di luar periode larangan, atau dengan pendekatan simulasi saturasi di laboratorium menggunakan sampel yang diambil pada musim kemarau, guna memvalidasi dan mengoreksi asumsi yang digunakan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. M. Evans, *Ore Geology and Industrial Minerals: An Introduction*, 3rd ed. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993.
- [2] R. P. Rini, A. Rachmansyah, and E. A. Suryo, "Analisis Longsor Massa Batuan di Jalan Ponorogo-Pacitan KM 226 dengan Metode Geological Strength Index (GSI)," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 8, no. 1, pp. 45–58, 2021.
- [3] D. Winarti, D. Karnawati, H. C. Hardiyatmo, and Srijono, "Karakteristik Geoteknik Tufa Andesit Teralterasi Hidrotermal Pemicu Luncuran Bahan Rombakan pada Lereng Pegunungan Selatan Pulau Lombok," *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, vol. 17, no. 3, pp. 149–162, 2016.
- [4] A. N. Adani, A. A. Fillah, E. Febrisabatini, M. C. Gunawan, and I. G. B. Indrawan, "Pengaruh Alterasi Hidrotermal Terhadap Tingkat Intensitas Gerakan Massa di Desa Klesem dan Sekitarnya, Pacitan, Jawa Timur," *Jurnal Geologi dan Pertambangan*, 2021.
- [5] F. Pirajno, *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Dordrecht: Springer Science and Business Media, 2009, pp. 727–883.
- [6] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [7] B. M. Das, *Principles of Foundation Engineering*, 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2016.
- [8] A. W. Skempton, "The Colloidal Activity of Clays," in *Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zurich, vol. 1, pp. 57–61, 1953.
- [9] J. K. Mitchell and K. Soga, *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [10] R. Ginanjar and I. A. Sadisun, "Karakteristik Mineral Lempung Bawah Tanah Ciurug Level 600, Pongkor, Jawa Barat," *Jurnal Geologi Pertambangan*, vol. 27, no. 2, pp. 65–78, 2020.
- [11] H. Samodra, S. Gafoer, and S. Tjokrosapoetro, *Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, 1992.
- [12] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 3rd ed. Boston, MA: PWS Publishing, 1994.
- [13] R. F. Craig, *Soil Mechanics*, 4th ed. London: Chapman and Hall, 1987.
- [14] L. Á. Jiménez López, J. M. Sánchez Núñez, A. Pola, J. C. Escamilla Casas, H. I. Sereno, P. Rodríguez Contreras, and M. E. Serrano Flores, "Hydrothermally Altered Rocks and Their Implications for Debris Flow Generation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, Mexico," *GeoHazards*, vol. 6, no. 4, p. 62, Oct. 2025, doi: 10.3390/geohazards6040062.
- [15] R. Ginanjar and I. A. Sadisun, "Karakteristik Geoteknik Mineral Lempung pada Terowongan Tambang Bawah Tanah Ciurug Level 600, Pongkor, Jawa Barat," *Bulletin of Geology*, vol. 3, no. 1, pp. 328–332, 2019, doi: 10.5614/bull.geol.2019.3.1.6.
- [16] R. F. Craig, *Craig's Soil Mechanics*, 7th ed. London: Spon Press, 2004.

- [17] A. R. Akbarrina, Y. Zaika, dan A. Rachmansyah, “Reinforcement of Slope Failure on Ponorogo–Pacitan KM 226 Road to Mitigate Landslides,” *Rekayasa Sipil*, vol. 19, no. 1, pp. 1–6, 2025, doi: 10.21776/ub.rekayasasipil.2025.019.01.1.