

Mencegah Kelongsoran dengan Meningkatkan Angka Keamanan Lereng

Apriliya Laily Rahmawati¹, Agata Iwan Candra^{2*}, Redyka Sefiyanti³,
Nadiya Husna⁴, Bagas Febrian⁵

^{1,2,3,4,5} Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kediri, 64115, Indonesia

*Corresponding author, e-mail: iwan_candra@unik-kediri.ac.id

Received 2nd May 2023; 1st Revision 19th May 2023; Accepted 20th June 2023

DOI: <https://doi.org/10.24036/cived.v10i2.123822>

ABSTRAK

Kecamatan Pujon merupakan daerah dengan intensitas bencana longsor cukup tinggi. Tanah longsor terjadi di Dusun Sukomulyo, Kabupaten Malang dipengaruhi oleh minimumnya vegetasi berakar dan tingginya intensitas curah hujan yang berdampak negatif bagi masyarakat sekitar. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis kestabilan lereng dengan dilakukan pengujian untuk menentukan nilai atterberg limit, gradasi ayakan, uji kuat geser, analisis stabilitas lereng dan optimalisasi sudut kemiringan sebagai upaya penanganan risiko bencana tanah longsor. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pengujian di lapangan dan di laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tipe longsor daerah penelitian yaitu translasi slide. Didapatkan nilai plastic index 26,22 % dengan jenis tanah Sand Poorly Graded. Hasil Pengujian Geser menghasilkan sudut geser 3,12 dan kohesi 7,68 pada keadaan basah. Hal tersebut diketahui Nilai $F_s < 1$ menunjukkan lereng kurang stabil, dengan cara melakukan pemotongan atau pelandaian lereng menjadi 16 derajat maka nilai factor of safety 1,04 $F_s > 1$ dinyatakan stabil. Penelitian ini dilakukan sebagai dasar awal dalam merencanakan kemiringan lereng yang stabil, sehingga terjadinya kelongsoran bisa diminimalkan.

Kata Kunci: Indeks Plastis; Tanah Longsor; Sudut Geser; Stabilitas Lereng; F_s .

ABSTRACT

Pujon District is an area with a high intensity of landslides. Landslide that occurred in sukumulyo Hamlet, Malang Regency were affected by a minimum of original vegetation and high intensity of rainfall which had a negative impact on the surrounding community. The purpose of this study was to analyze the stability of the slope by conducting tests to determine the atterberg limit values, gradation of way, shear strength tests, analysis of slope stability and optimization of slope angles as an effort to deal with the risk of landslides. This study used a quantitative method with field and laboratory tests. The Results showed that the type of landslide in the study area was slide translation. Obtained a plastic index value of 26,22% with sand poorly graded soil type. The results of the shear test yielded a shear angle of 3,12 and a cohesion of 7,68 in the wet state. It is known that the value of $F_s < 1$ indicates the slope is less stable, by doing exercises or sloping the slope to 16 degrees, the safety factor value of 1,04 $F_s > 1$ is declared stable. This research was conducted as an initial basis in planning a stable slope, so that the occurrence of landslides can be minimized.

Keywords: Index Plastic; Landslide; Sliding Angle; Slope Stability; F_s .

Copyright © Apriliya Laily Rahmawati, Agata Iwan Candra, Redyka Sefiyanti, Nadiya Husna, Bagas Febrian

This is an open access article under the: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PENDAHULUAN

Kecamatan Pujon terkenal dalam skala lokal atau regional dan sekarang ini berkembang menjadi kecamatan “Destinasi Pariwisata“ Artinya melayani masyarakat dalam kegiatan berlibur yang menarik di Kabupaten Malang, Jawa Timur. Pelayanan dalam sektor Pariwisata dan budaya serta memiliki pesona alam pegunungan yang memukau dengan udara segar dan pemandangan yang menakjubkan. Pemerintah setempat dapat mengelola destinasi wisata, memfasilitasi acara budaya, dan menyediakan informasi serta dukungan bagi pengunjung maupun masyarakat. Selain itu, sektor pariwisata juga memberikan kontribusi penting dalam perekonomian daerah ini. Daerah dengan intensitas hujan yang tinggi beberapa hari terakhir mengakibatkan tanah longsor di Pujon. Jika longsor terjadi terus menerus dapat mengganggu aktivitas pariwisata dan berdampak negatif terhadap pendapatan mata pencaharian masyarakat setempat, sehingga telah diusulkan untuk memprediksi data curah hujan bulanan [1]. Daerah dengan wilayah reliefnya yang berbukit-bergunung dan kelerengannya terjal menyebabkan sering mengalami bencana alam terutama longsor. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Malang, melaporkan bahwa pada bulan Februari tahun 2023 telah terjadi 3 hari kejadian bencana longsor yang mengakibatkan 1 korban luka dan 1 korban jiwa di Pujon. Informasi data yang diperoleh dapat dibandingkan dengan ringkasan tanah longsor lainnya untuk memandu penyidikan tambahan dan tindakan mitigasi [2]. Longsor susulan yang terjadi di wilayah Desa Sukomulyo, Kecamatan Pujon, Kabupaten Malang membuat akses jalan provinsi penghubung Malang-Kediri ditutup sementara. Kendala yang dihadapi saat kondisi cuaca turun hujan hingga malam hari dikhawatirkan tanah masih labil dan berpotensi longsor lagi. Kecamatan Pujon sendiri telah menjadi salah satu destinasi wisata di Malang karena lokasinya dekat dengan Kota Batu dan jadi jalur alternatif [3]. Kecamatan Pujon memiliki objek wisata yang cukup banyak dan beragam. Dari data sensus jumlah rata-rata wisatawan domestik pada tahun 2017-2019 sebanyak 4.771.961 jiwa, sedangkan pada tahun 2020-2022 turun menjadi 1.394.674 jiwa (Badan Pusat Statistik Kota Malang).

Tanah longsor merupakan suatu peristiwa yang bisa terjadi tanpa diduga terlebih dahulu dan datangnya secara tiba-tiba yang sering terjadi di Indonesia. Tanah longsor memberikan dampak negatif bagi masyarakat sekitar. Tanah longsor mempengaruhi sektor utama seperti transportasi, pertanian dan menyebabkan banyak korban hilangnya nyawa. Tidak hanya itu, tanah longsor juga pengaruh terhadap sektor perekonomian. Tercatat telah terjadi kerugian ekonomi hingga milyaran dalam setiap tahun.

Tanah longsor disebabkan oleh beberapa faktor sebagian besar karena kondisi geologi, dimana daerah lereng tersebut merupakan wilayah yang mudah terinfiltrasi air, sehingga tebalnya lapisan tanah yang lolos air serta kondisi lereng minimum vegetasi berakar kuat. Tidak adanya vegetasi berakar di sekitar lereng dan adanya penggundulan pohon. Selain minimum vegetasi. disebabkan oleh curah hujan yang berkepanjangan dapat meningkatkan risiko bencana tanah longsor karena mempercepat proses pelemahan kekuatan tanah dan menurunkan nilai kohesi dan sudut geser tanah. Selain curah hujan, kekuatan tanah merupakan faktor penting yang mempengaruhi kemiringan lereng. Kemiringan lereng tanah longsor dengan sudut 46 derajat sering kali dianggap berbahaya karena kemungkinan pergerakan massa yang lebih besar dan kecepatan yang tinggi. Sudut kemiringan ini menunjukkan bahwa lereng memiliki kecuraman yang signifikan yang membuat tanah atau batuan menjadi tidak stabil $F_s < 1$ karena melebihi kemampuan untuk menahan gaya gravitasi, sehingga dapat meningkatkan risiko pergerakan massa tanah atau batuan ke bawah. Studi

tanah longsor yang diinduksi curah hujan pernah dilakukan penelitian oleh [4]. Oleh karena itu, pentingnya pemahaman terhadap kondisi tanah dan curah hujan dalam menganalisis karakteristik tanah, kekuatan tanah dan kemiringan lereng untuk melakukan evaluasi dan pengelolaan risiko tanah longsor, sehingga dapat membantu dalam menentukan kemiringan yang aman dan mengurangi risiko kegagalan tanah longsor .

Tujuan dari Penelitian ini untuk menganalisis kestabilan lereng dengan melakukan pengujian atterberg limit, gradasi ayakan, uji kuat geser, analisis stabilitas lereng dan upaya perbaikan lereng. Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mengetahui informasi terkait stabilitas lereng dan mengurangi banyaknya korban jiwa akibat tanah longsor. Manfaat dari penelitian yang dilakukan untuk merencanakan kemiringan lereng yang stabil untuk menjaga keselamatan manusia dengan cara memotong atau melandaikan kemiringan lereng. Sehingga risiko terjadinya longsor dapat dikurangi secara signifikan, Hal ini membantu melindungi jiwa dan mencegah terjadinya kecelakaan yang disebabkan oleh longsor.

METODE

Penelitian penanggulangan longsor di Dusun Sukomulyo Desa Kedungrejo Kecamatan Pujon Kabupaten Malang dilakukan dengan metode pengujian di lapangan, pengujian di laboratorium dan analisis lereng. Untuk dapat menentukan tipe perkuatan yang paling tepat pada kasus longsor di area tebing tersebut diperlukan beberapa tahapan penelitian.

Investigasi Lapangan

Investigasi lapangan dilakukan untuk mengetahui kondisi longsor tebing. Tahapan ini digunakan untuk menentukan pengujian-pengujian yang harus dilakukan. Selain itu, peninjauan lapangan dilakukan untuk menentukan hipotesis awal tentang penyebab kelongsoran.

Pengujian Tanah

Untuk mendapatkan parameter tanah perlu dilakukan pengujian laboratorium. Pengambilan sampel tanah pada area longsor, selanjutnya dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian. Uji parameter tanah yang dilakukan di laboratorium diantaranya adalah atterberg limit, gradasi ayakan dan uji kuat geser tanah. Semua pengujian dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kadiri.

Analisis Perkuatan Tanah

Untuk mendapatkan tipe perkuatan yang sesuai diperlukan analisis perhitungan terlebih dahulu. Analisa perkuatan dilakukan dengan perhitungan metode Culmann's. Model geometri lereng diperoleh dari hasil pengukuran lapangan. Sedangkan parameter tanah dan struktur diperoleh dari hasil pengujian dan asumsi. Dari hasil perhitungan akan diperoleh nilai FS yang aman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Jenis Tanah Vs kelongsoran

Tabel 1. Gradasi Ayakan

Number Sieve	Particle Diameter (mm)	Retained Soil (gr)	Percent of Retained (%)	Percent of Passing (%)
		0		100
4	4,750	10	1,00	99,00
10	2,000	247	24,65	74,35
30	0,600	564	56,29	18,06
40	0,425	98	9,78	8,28
80	0,180	62	6,19	2,10
100	0,150	3	0,30	1,80
200	0,075	13	1,30	0,50
Pan		5	0,50	0,00
Total		1002	100,00	

Table 5.2 Unified Soil Classification System (Based on Material Passing 76.2-mm Sieve)

Criteria for assigning group symbols				Group symbol	
Coarse-grained soils More than 50% retained on No. 200 sieve	Gravels More than 50% of coarse fraction retained on No. 4 sieve	Clean Gravels	$C_u \geq 4$ and $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ and/or $C_c < 1$ or $C_c > 3^c$	GW GP	
		Gravels with Fines More than 12% fines ^{a,d}	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) $PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	GM GC	
	Sands 50% or more of coarse fraction passes No. 4 sieve	Clean Sands	$C_u \geq 6$ and $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ and/or $C_c < 1$ or $C_c > 3^c$	SW SP	
		Sands with Fines More than 12% fines ^{b,d}	$PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) $PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3)	SM SC	
		Fine-grained soils 50% or more passes No. 200 sieve	Silts and clays Liquid limit less than 50	Inorganic	$PI > 7$ and plots on or above "A" line (Figure 5.3) ^e $PI < 4$ or plots below "A" line (Figure 5.3) ^e
	Organic			$\frac{\text{Liquid limit—oven dried}}{\text{Liquid limit—not dried}} < 0.75$; see Figure 5.3; OL zone	OL
Silts and clays Liquid limit 50 or more	Inorganic		PI plots on or above "A" line (Figure 5.3) PI plots below "A" line (Figure 5.3)	CH MH	
	Organic		$\frac{\text{Liquid limit—oven dried}}{\text{Liquid limit—not dried}} < 0.75$; see Figure 5.3; OH zone	OH	
Highly organic soils	Primarily organic matter, dark in color, and organic odor			Pt	

^aGravels with 5 to 12% fine require dual symbols: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bSands with 5 to 12% fines require dual symbols: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dIf $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol GC-GM or SC-SM.

^eIf $4 \leq PI \leq 7$ and plots in the hatched area in Figure 5.3, use dual symbol CL-ML.

Gambar 1. USCS

Tabel 2. Material Modeling Information

Page 17 of 18 54

	Gravel % (% retained in 4.75 mm)	Sand % (% passing 4.75 mm)	finer %	Plasticity index	USCS CLASS
Kyarkali Nala slide					SP-SM
KNS-A	15.2	82.2	2.5	1.04	
KNS-B	26.0	68.2	5.6	2.52	
KNS-C	25.4	67.6	6.9	2.91	
KNS-D	24.3	70.1	5.4	1.61	
KNS-E	18.9	74.8	6.2	3.43	
KNS-F	22.5	70.5	6.9	4.99	
Niste A slide					SP-SM
NAS-A	16.5	78.3	5.1	3.57	
NAS-B	15.6	78.8	5.4	0.46	
NAS-C	19.2	74.5	6.2	2.34	
Kandriyana East slide					SP-SM
KES-A	17.5	76.6	5.7	1.74	
KES-B	15.6	77.9	6.3	0.74	
KES-C	18.5	75.0	6.4	2.85	
Niste B slide					SP
NBS-A	26.4	72.5	1.0	1.13	
NBS-B	22.7	75.7	1.5	1.76	
NBS-C	24.5	74.2	1.3	0.71	
NBS-D	26.5	71.0	2.4	1.16	
NBS-E	26.9	71.1	1.9	0.78	
NBS-F	23.7	75.3	0.9	3.96	

Tabel 3. Factor of safety In Dry

Slide name	Sec	Height of slope (H)	Slope angle (Ψ)	Density of soil (γ)	Cohesion (C)	Angle of internal friction (Φ)	(C/ γ) Htan ϕ	Y (F1)	X (F2)	Factor of safety (F)	
Kyarkali	AB	162	40	1.63	0.179	39.50	0.007-0.01	Dry	1.18	0.96	1.08
								25%	1.03	0.84	0.93
								50%	0.82	0.75	0.78
	CD	168	40	1.63	0.196	38.23	0.009-0.01	Dry	1.12	1.02	1.07
								25%	0.98	0.89	0.93
								50%	0.78	0.79	0.78
Niste A	AB	67	41	1.65	0.204	30.79	0.03	Dry	0.97	1.08	1.02
								25%	0.90	0.97	0.93
								50%	0.77	0.87	0.82
Kandriyana	AB	77	45	1.58	0.192	36.35	0.02	Dry	1.00	1.05	1.02
								25%	0.92	0.99	0.95
								50%	0.80	0.88	0.84
Niste B	AB	153	42	1.82	0.198	41.02	0.01	Dry	1.18	0.88	1.03
								25%	1.00	0.79	0.89
								50%	0.85	0.71	0.78
	CD	146	38	1.82	0.186	43.94	0.01	Dry	1.46	1.00	1.23
								25%	1.20	0.87	1.03
								50%	1.01	0.70	0.85

Berdasarkan Tabel 2. tanah termasuk dalam golongan SP , berdasarkan Tabel 3. tanah SP pada saat keadaan kering 50 % memiliki nilai Fs 0.77 dengan kemiringan lereng 41 derajat pada saat keadaan kering, hasil dari observasi didapatkan Gambar 1 bahwa tanah merupakan tanah SP dengan angka Fs < 1.

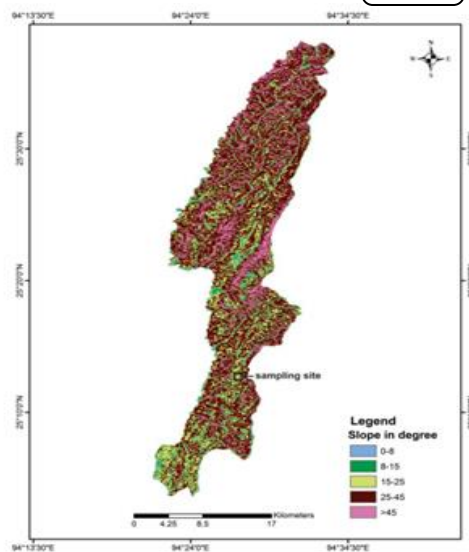
Konsistensi Tanah Vs kelongsoran

Tabel 4. Batas Konsistensi Tanah

PLASTIC LIMIT (%)	LIQUID LIMIT (%)	INDEX PLASTICS (%)
21.84	48.061	26.22

Tabel 5. Data Penentuan Batas Atterberg

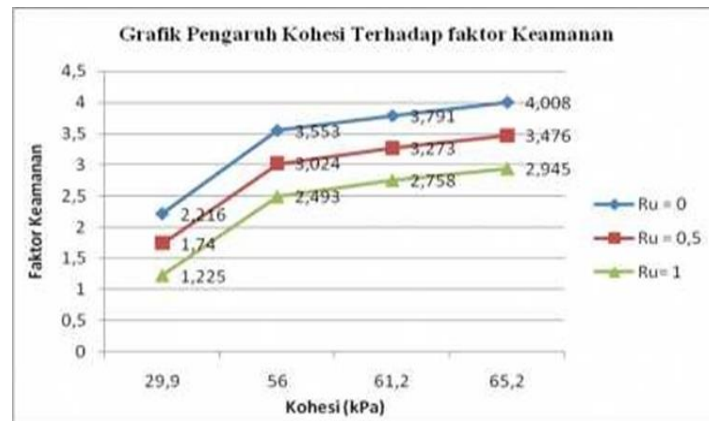
Sampel	Batas cair (WL) %	Batas plastik (WP) %	Batas penyusutan (WS) %	Indeks Plastisitas (IP)	Indeks kuintiditas (IL) %	Indeks konsistensi (IC)
Nungbi Khunou	48	26.236	9.4	21.764	60.623	0,327



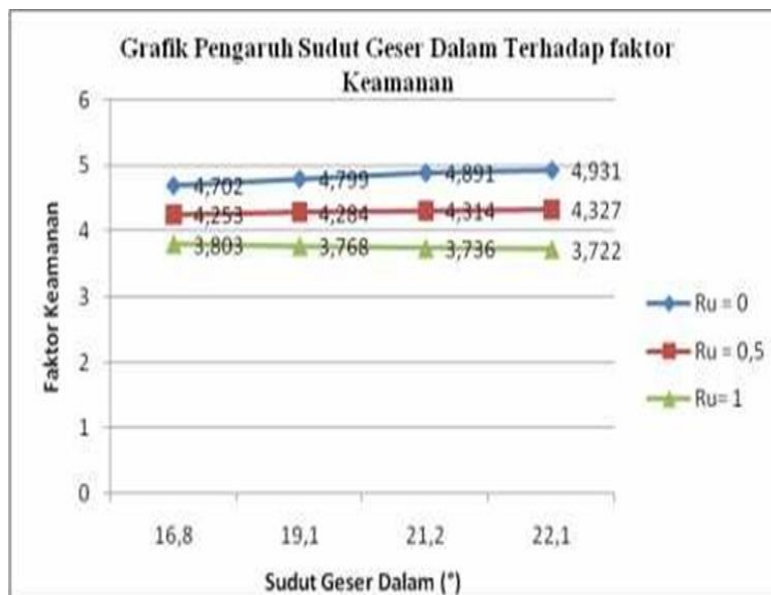
Gambar 2. Peta kemiringan daerah studi

Berdasarkan Tabel 5. dan Gambar 2.[5] memiliki kemiringan lereng $> 45^\circ$ dengan ketinggian 80 m dan memiliki nilai index plastik sebesar 26.22% termasuk dalam *High Plasticity* memiliki nilai F_s sebesar 0.405, sehingga tanah hasil dari observasi Tabel 4. dengan nilai index plastik sebesar 26.22 pada kemiringan 60° termasuk dalam *High Plasticity* memiliki nilai $F_s < 1$.

3. Sudut Geser Longsor



Gambar 3 .Grafik Pengaruh Kohesi Terhadap Faktor Keamanan



Gambar 4. Grafik Pengaruh Sudut Geser Dalam Terhadap Faktor Keamanan

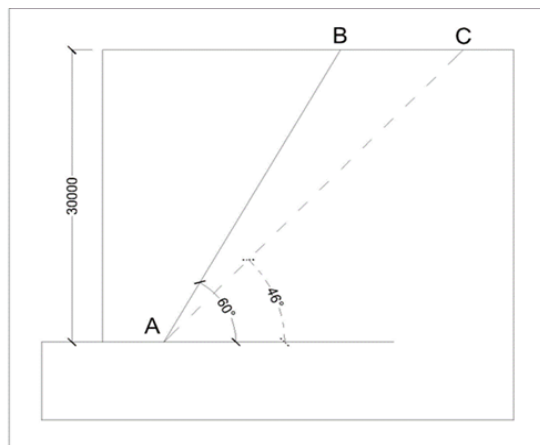
Dari Gambar 3. dan gambar 4. tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar nilai kohesi maka semakin besar nilai faktor keamanan lereng, semakin besar nilai sudut geser maka semakin besar nilai faktor keamanan.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan Lereng

Kohesi (Mpa)	Sudut Geser (derajat)	Fs
8.476	5.894	0.981
15.436	6.953	0.687
11.113	4.765	0.52

Berdasarkan Tabel 6. Pada tanah dengan kohesi 8.476 memiliki nilai sudut geser 5.894, nilai ini pada perhitungan F_s diperoleh nilai $F_s < 1$ [6]. Sehingga tanah Hasil Observasi dengan nilai kohesi 7,678 yang memiliki sudut geser 4.140 menunjukkan bahwa nilai F_s kurang dari 1.

4. Stabilitas Lereng



Gambar 5. Stabilitas Lereng

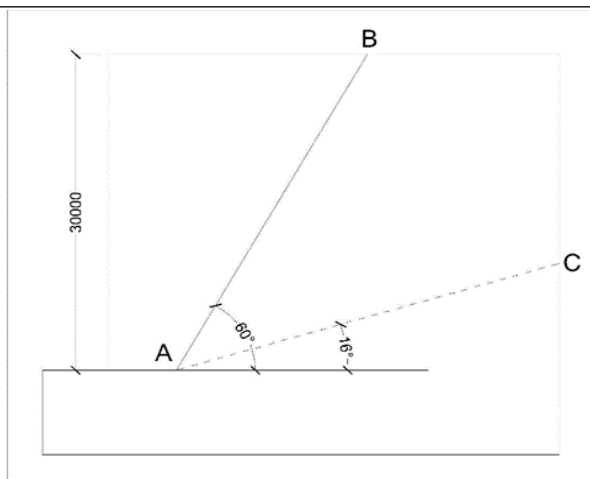
Tabel 7. Slope Stability

Kode	β Sebelum	β Setelah	c'	γ	H	ϕ'	F_s
WET	60	46.00	4.14	15.09	30	7.68	0.25
DRY	60	46.00	3.12	10.23	30	12.11	0.34

Dari perhitungan F_s Tabel 4. sampel basah dengan nilai kohesi 7.68 kPa dan sudut geser 4.14 derajat memiliki nilai F_s nya adalah 0.25, sama halnya dengan tanah kering dengan nilai kohesi 12.11 kPa dan sudut geser 3.12 derajat nilai F_s adalah 0.34 [7], sehingga dari semua hasil perhitungan diketahui nilai lereng tidak stabil karena $F_s < 1$. Hal ini mengidentifikasi bahwa lereng rawan akan kejadian longsor [8].

5. Upaya Perbaikan lereng

Salah satu upaya perbaikan lereng adalah pemotongan dan pelandaian lereng, potong lereng bagian atas dan pengelupasan lereng yang selanjutnya dilakukan pemadatan [9]. Pada kemiringan lereng 60° dapat dilakukan pemotongan mencapai kemiringan 16° , yang nantinya hal tersebut dapat meningkatkan F_s lebih dari 1 [10][11].



Gambar 6 : Sket optimasi sudut kemiringan

Tabel 8. Optimasi sudut kemiringan

β Sebelum	β Setelah	c'	γ	H	ϕ'	Fs
60	16.00	4.14	11.11	30	14.39	1.04

Pada Gambar 6. dan Tabel 8. dapat diketahui dengan kemiringan lereng 16° dapat merubah nilai Fs menjadi stabil yaitu 1.04, sehingga lereng akan lebih aman terhadap longsor.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian diketahui bahwa longsor pada lereng Dsn. Sukomulyo Ds. Kedungrejo Kec. Pujon Kab. Malang adalah hasil pengujian tanah tergolong jenis tanah (SP) Sand poorly graded, memiliki nilai $F_s < 1$. Pada pengujian atterberg limit didapatkan nilai plastic index 26.22 % termasuk dalam High Plasticity memiliki nilai $F_s < 1$. Berdasarkan pengujian kuat geser diperoleh sudut geser basah dan kering sebesar 3.12 ,4.14 dan kohesi 7.68 ,12.11, dalam hasil tersebut menunjukkan nilai $F_s < 1$.

Perhitungan stabilitas lereng dengan penggunaan metode Culmann's didapatkan hasil nilai factor of safety (F_s) 0.25 - 0.34, dengan kemiringan lereng sebesar 60° dan tinggi 30 m menjadi salah satu faktor terjadinya longsor. Dari perhitungan stabilitas lereng diketahui hasil factor of safety (FS) tersebut dapat digunakan sebagai upaya perbaikan keamanan lereng menjadi stabil. Dengan melakukan pemotongan dan pelandaian lereng pada area bukit, kemiringan yang semula 60° menjadi 16° . Sehingga upaya tersebut dapat mencegah terjadinya tanah longsor.

REFERENSI

- [1] V. Vaidya, "Rainfall prediction," *Asian Agrihist.*, vol. 17, no. 1, p. 1, 2013.
- [2] H. Wang, L. Zhang, K. Yin, H. Luo, and J. Li, "Landslide identification using machine learning," *Geosci. Front.*, vol. 12, no. 1, pp. 351–364, 2021, doi: 10.1016/j.gsf.2020.02.012.

- [3] Y. Nurhayati, Pudjihardjo, Susilo, and M. Ekawaty, "Sustainability Strategy in Malang Regency: Analytical Hierarchy Process Approach," *J. Bus. Hosp. Tour.*, vol. 8, no. 1, pp. 64–77, 2022, [Online]. Available: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [4] A. Dikshit, R. Sarkar, B. Pradhan, S. Segoni, and A. M. Alamri, "Rainfall induced landslide studies in Indian Himalayan region: A critical review," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 7, pp. 1–24, 2020, doi: 10.3390/app10072466.
- [5] H. Bidyashwari, R. S. Kushwaha, M. Chandra, and M. Okendro, "Physical Properties of Soil and Its Implication to Slope Stability of Nungbi Khunou, NH-150, Manipur," *Int. J. Geosci.*, vol. 08, no. 11, pp. 1332–1343, 2017, doi: 10.4236/ijg.2017.811077.
- [6] Y. Madora, M. Asof, and Mukiat, "Geser Dengan Metode Direct Shear Test Di Pit Muara Tiga Besar Utara Pt . Bukit Asam (Persero) Tbk Slope Stability Analysis Based on Results of Shear Strength Test With Direct Shear Test Method in Pit Muara Tiga Besar Utara Pt . Bukit Asam (Persero) Tbk," pp. 0–9, 2016.
- [7] J. Stacho, M. Sulovska, and I. Slavik, "Determining the shear strength properties of a soil-geogrid interface using a large-scale direct shear test apparatus," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 4, pp. 989–998, 2020, doi: 10.3311/PPci.15766.
- [8] J. Kundu, K. Sarkar, and T. N. Singh, "Static and Dynamic Analysis of Rock Slope - A Case Study," *Procedia Eng.*, vol. 191, pp. 744–749, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.240.
- [9] A. Kainthola *et al.*, "Hill slope stability examination along Lower Tons valley, Garhwal Himalayas, India," *Geomatics, Nat. Hazards Risk*, vol. 12, no. 1, pp. 900–921, 2021, doi: 10.1080/19475705.2021.1906758.
- [10] S. P. Pradhan and T. Siddique, "Stability assessment of landslide-prone road cut rock slopes in Himalayan terrain: A finite element method based approach," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–73, 2020, doi: 10.1016/j.jrmge.2018.12.018.
- [11] M. Shariati, S. M. Azar, M. A. Arjomand, H. S. Tehrani, M. Daei, and M. Safa, "Evaluating the impacts of using piles and geosynthetics in reducing the settlement of fine-grained soils under static load," *Geomech. Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 87–101, 2020, doi: 10.12989/gae.2020.20.2.087.