

Analisis Karakteristik Tebing dan Stabilitas Lereng dengan Metode Fellenius serta Penanggulangannya Menggunakan Dinding Penahan Tanah Kantilever pada Ruas Jalan Malakiri–Karua STA 11+800

Andika Apriyanto¹, Shalbin Sampe Padang²

^{1,2} Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia
corresponding author : andikaapriyanto@gmail.com

ABSTRAK

Kata Kunci:
Stabilitas Lereng
Metode Fellenius
Dinding Penahan Tanah
Tipe Kantilever
Tanah Longsor

Ruas jalan Malakiri–Karua STA 11+800 di Lembang Karua, Kecamatan Balusu, Kabupaten Toraja Utara, berada pada daerah berkontur miring yang sering mengalami kelongsoran tebing pada musim hujan sehingga mengganggu arus lalu lintas. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik tebing dan tanah penyusunnya, menganalisis stabilitas lereng, serta merencanakan penanggulangan kelongsoran. Data primer diperoleh melalui pengukuran geometri longsor di lapangan dan pengujian laboratorium terhadap sampel tanah, meliputi berat jenis, kadar air dan berat isi, batas-batas Atterberg, analisis saringan, pemadatan, dan geser langsung. Stabilitas lereng dianalisis dengan metode irisan Fellenius, sedangkan penanggulangan direncanakan menggunakan dinding penahan tanah tipe kantilever. Tebing memiliki tinggi 10 m, panjang bidang miring 15,5 m, dan kemiringan 40°. Tanah tergolong A-6(5) menurut AASHTO dan CL menurut USCS, dengan berat jenis 2,69, kadar air 19,57%, batas cair 24,35%, indeks plastisitas 12,26%, dan persentase lolos saringan No. 200 sebesar 65,32%. Uji geser langsung menghasilkan kohesi 2,10 kN/m² dan sudut geser dalam 30,21°. Faktor keamanan lereng dengan metode Fellenius sebesar 0,98, lebih kecil dari 1,0 maupun syarat 1,5, sehingga lereng tidak stabil dan sesuai dengan kondisi longsor di lapangan. Dinding penahan tanah kantilever setinggi 5 m dengan lebar dasar 3 m menghasilkan faktor keamanan terhadap guling 3,35, geser 1,59, dan daya dukung 4,00, seluruhnya memenuhi persyaratan. Dinding penahan tanah tipe kantilever dapat diterapkan untuk menanggulangi kelongsoran pada lokasi tersebut, dengan stabilitas geser sebagai parameter yang paling menentukan.

Keywords:
Slope Stability
Fellenius Method
Retaining Wall
Cantilever Type
Landslide

ABSTRACT

The Malakiri–Karua road section at STA 11+800 in Lembang Karua, Balusu District, North Toraja Regency, lies in sloping terrain that frequently experiences cut-slope failures during the rainy season, disrupting traffic. This study aims to identify the characteristics of the cut slope and its soil, analyze slope stability, and design a landslide mitigation measure. Primary data were obtained from field measurements of the landslide geometry and laboratory tests on soil samples, including specific gravity, water content and unit weight, Atterberg limits, sieve analysis, compaction, and direct shear. Slope stability was analyzed using the Fellenius method of slices, and mitigation was designed using a cantilever retaining wall. The slope is 10 m high, with an inclined length of 15.5 m and an inclination of 40°. The soil is classified as A-6(5) according to AASHTO and CL according to USCS, with a specific gravity of 2.69, water content of 19.57%, liquid limit of 24.35%, plasticity index of 12.26%, and 65.32% passing the No. 200 sieve. The direct shear test yielded a cohesion of 2.10 kN/m² and an internal friction angle of 30.21°. The factor of safety of the slope using the Fellenius method was 0.98, lower than both 1.0 and the required 1.5, indicating an unstable slope consistent with the observed failure. A 5 m high cantilever retaining wall with a 3 m base width yielded factors of safety against overturning, sliding, and bearing capacity of 3.35, 1.59, and 4.00, respectively, all meeting the requirements. A cantilever retaining wall can therefore be

applied to mitigate the landslide at this location, with sliding stability being the most critical parameter.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license.



I. Pendahuluan

Tanah longsor merupakan gerakan massa tanah atau batuan menuruni lereng yang terjadi ketika tegangan geser yang bekerja melampaui kuat geser material penyusun lereng [1]. Gerakan ini dapat berlangsung perlahan maupun tiba-tiba, dan jenisnya bergantung pada material, mekanisme, serta kecepatan pergerakannya [2]. Pada lereng tanah kohesif, kelongsoran umumnya dipicu oleh hujan yang meningkatkan kadar air dan tekanan air pori sehingga kuat geser tanah menurun, sementara berat massa tanah bertambah [3].

Jalan di daerah pegunungan sangat rentan terhadap kelongsoran karena pembukaan badan jalan menghasilkan tebing galian dengan kemiringan curam. Kelongsoran tebing tidak hanya merusak badan jalan, tetapi juga menutup jalur lalu lintas dan membahayakan pengguna jalan. Oleh karena itu, karakteristik tebing dan stabilitasnya perlu dievaluasi secara kuantitatif. Metode irisan Fellenius merupakan salah satu metode keseimbangan batas yang paling sederhana untuk menghitung faktor keamanan lereng [4], [5], dan hasilnya dibandingkan dengan faktor keamanan minimum yang disyaratkan dalam standar perancangan geoteknik [6].

Apabila lereng dinyatakan tidak stabil, diperlukan upaya penanggulangan, salah satunya dengan dinding penahan tanah. Dinding penahan tanah tipe kantilever banyak digunakan untuk ketinggian sedang karena memanfaatkan berat tanah di atas tumit (heel) untuk menahan guling dan geser, sehingga lebih efisien dibandingkan dinding gravitasi [7]. Perancangannya harus memenuhi kontrol stabilitas terhadap guling, geser, dan daya dukung tanah dasar.

Ruas jalan poros Malakiri–Karua di Lembang Karua, Kecamatan Balusu, Kabupaten Toraja Utara, berada pada daerah dengan kontur tanah miring dan sering mengalami kelongsoran pada badan maupun tepi jalan saat musim hujan, terutama pada STA 11+800. Penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi karakteristik tebing dan sifat tanah penyusunnya; (2) menganalisis stabilitas lereng dengan metode Fellenius; dan (3) merencanakan dinding penahan tanah tipe kantilever sebagai upaya penanggulangan kelongsoran beserta kontrol stabilitasnya.

II. Metode Penelitian

A. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada ruas jalan Malakiri–Karua STA 11+800, Lembang Karua, Kecamatan Balusu, Kabupaten Toraja Utara, pada koordinat sekitar $119^{\circ}58'34''$ – $119^{\circ}58'36''$ BT dengan ketinggian 1.080–1.090 m di atas permukaan laut. Kondisi tebing longsor di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kondisi Tebing Longsor pada Ruas Jalan Malakiri–Karua STA 11+800: (a) Tebing Longsor di Tepi Badan Jalan; (b) Bidang Longsor Dilihat dari Arah Jalan

B. Pengumpulan Data

Data primer terdiri atas data lapangan dan data laboratorium. Data lapangan diperoleh melalui survei, pengukuran geometri longsor menggunakan meteran, penentuan koordinat dan elevasi dengan aplikasi Google Earth Pro dan My Elevation, serta dokumentasi. Sampel tanah diambil dari tebing longsor menggunakan

sekop, cangkul, linggis, dan pipa besi, kemudian diuji di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja. Pengujian meliputi berat jenis, kadar air dan berat isi, batas-batas Atterberg, analisis saringan, dan pemadatan standar [8], serta uji geser langsung [9]. Tanah diklasifikasikan menurut sistem AASHTO [10] dan USCS [11]. Data sekunder berupa peta lokasi dan literatur.

C. Analisis Data

Berat isi kering dan angka pori tanah dihitung dari berat isi basah (γ_b), kadar air (w), dan berat jenis (G_s):

$$\gamma_d = \gamma_b / (1 + w) \quad e = (G_s \gamma_w / \gamma_d) - 1 \quad (1)$$

Parameter kuat geser ditentukan dari regresi linear tegangan geser maksimum terhadap tegangan normal pada uji geser langsung menurut kriteria Mohr-Coulomb [3]:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2)$$

Stabilitas lereng dianalisis dengan metode irisan Fellenius [4], [5]. Massa tanah di atas bidang longsor dibagi menjadi n irisan, dan faktor keamanan dihitung dengan:

$$F_s = \Sigma [c \Delta L_i + W_i \cos \alpha_i \tan \phi] / \Sigma [W_i \sin \alpha_i] \quad (3)$$

dengan W_i adalah berat irisan ke- i , α_i adalah sudut kemiringan dasar irisan, dan ΔL_i adalah panjang dasar irisan. Lereng dinyatakan aman apabila $F_s \geq 1,5$ [6]. Tekanan tanah lateral pada dinding penahan tanah dihitung dengan teori Rankine [3], [7]:

$$K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) \quad K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) \quad P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \quad P_p = \frac{1}{2} \gamma D^2 K_p + 2 c D \sqrt{K_p} \quad (4)$$

dengan H' adalah tinggi total dinding ditambah timbunan miring di atas tumit dan D adalah kedalaman tanah di depan dinding. Kontrol stabilitas terhadap guling dan geser dihitung dengan [7]:

$$FS_{\text{guling}} = \Sigma M_R / \Sigma M_O \quad FS_{\text{geser}} = [\Sigma V \tan(k_1 \phi) + B k_2 c + P_p] / (P_a \cos \alpha) \quad (5)$$

dengan $k_1 = k_2 = 2/3$. Eksentrisitas dan tegangan kontak di bawah pondasi dihitung dengan:

$$e = B/2 - (\Sigma M_R - \Sigma M_O) / \Sigma V \quad q_{\text{maks,min}} = (\Sigma V / B)(1 \pm 6e/B) \quad (6)$$

Daya dukung ultimit tanah dasar dihitung dengan persamaan daya dukung umum yang memperhitungkan faktor kedalaman dan kemiringan beban [12], [13]:

$$q_u = c N_c F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad FS_{\text{daya dukung}} = q_u / q_{\text{maks}} \quad (7)$$

dengan $N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2)$, $N_c = (N_q - 1) \cot \phi$, dan $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$. Faktor keamanan minimum yang digunakan adalah 2,0 untuk guling, 1,5 untuk geser, dan 3,0 untuk daya dukung [6], [7].

III. Hasil dan Pembahasan

A. Karakteristik Tebing

Hasil pengukuran lapangan menunjukkan bahwa tebing longsor memiliki tinggi (A–B) 10 m, panjang bidang miring (B–C) 15,5 m, dan lebar dasar (A–C) 11,84 m, dengan panjang longsor di sepanjang jalan sekitar 25 m. Sudut kemiringan tebing dihitung dari $\sin \beta = 10/15,5 = 0,645$, sehingga $\beta = 40,2^\circ \approx 40^\circ$. Kemiringan ini tergolong curam untuk lereng tanah kohesif, terlebih karena tebing berada langsung di tepi badan jalan tanpa perkuatan maupun drainase lereng yang memadai.

B. Sifat Fisik dan Klasifikasi Tanah

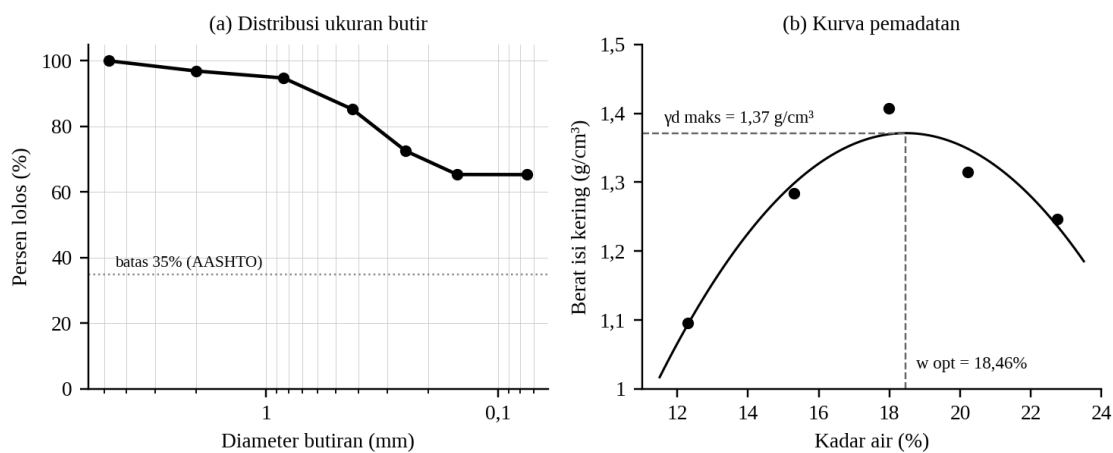
Hasil pengujian sifat fisik tanah disajikan pada Tabel 1. Tanah memiliki berat jenis 2,69, kadar air 19,57%, dan berat isi basah 1,50 g/cm³. Dengan Persamaan (1), berat isi kering rata-rata adalah 1,26 g/cm³ dengan angka pori 1,14, porositas 53,3%, dan derajat kejenuhan 46,1%. Angka pori yang tinggi menunjukkan struktur tanah yang lepas, sehingga tanah mudah menyerap air dan kehilangan kekuatan pada saat hujan.

Tabel 1. Sifat Fisik dan Klasifikasi Tanah Tebing STA 11+800

Parameter	Nilai	Satuan
Berat jenis (G_s)	2,69	–
Kadar air lapangan (w)	19,57	%
Berat isi basah (γ_b)	1,50	g/cm ³
Berat isi kering (γ_d)	1,26	g/cm ³
Angka pori (e)	1,14	–
Porositas (n)	53,31	%
Derajat kejenuhan (S_r)	46,10	%
Batas cair (LL)	24,35	%
Batas plastis (PL)	12,09	%
Indeks plastisitas (IP)	12,26	%

Parameter	Nilai	Satuan
Lolos saringan No. 10 / No. 40 / No. 200	96,90 / 85,26 / 65,32	%
Kadar air optimum (w_{opt})	18,46	%
Berat isi kering maksimum (γ_d maks)	1,37	g/cm^3
Kohesi (c)	2,10	kN/m^2
Sudut geser dalam (ϕ)	30,21	$^\circ$
Klasifikasi AASHTO / USCS	A-6(5) / CL	–

Distribusi ukuran butir dan kurva pemadatan disajikan pada Gambar 2. Sebanyak 65,32% butiran lolos saringan No. 200, sehingga tanah termasuk tanah berbutir halus. Dengan batas cair 24,35% dan indeks plastisitas 12,26%, tanah diklasifikasikan sebagai A-6 menurut AASHTO dengan indeks kelompok 5, yaitu tanah berlempung dengan penilaian sedang hingga buruk sebagai tanah dasar [10]. Menurut USCS, tanah berada di atas garis A pada bagan plastisitas dengan batas cair kurang dari 50% sehingga tergolong CL, yaitu lempung anorganik berplastisitas rendah [11]. Uji pemadatan standar menghasilkan kadar air optimum 18,46% dan berat isi kering maksimum 1,37 g/cm^3 .



Gambar 2. (a) Kurva Distribusi Ukuran Butir dan (b) Kurva Pemadatan Tanah

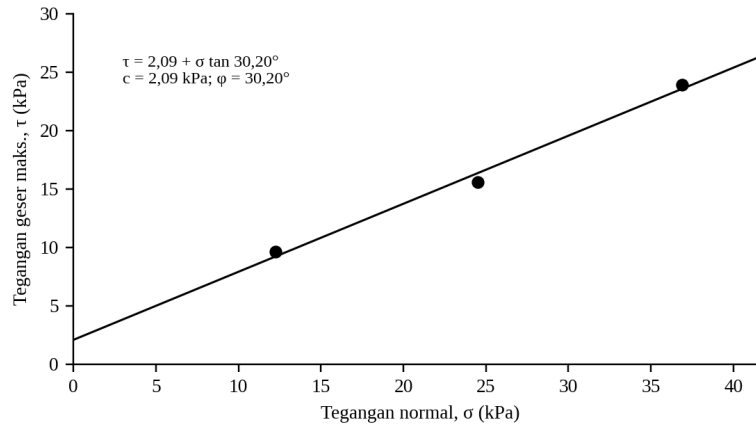
Kadar air lapangan (19,57%) sedikit di atas kadar air optimum, sedangkan berat isi kering lapangan (1,26 g/cm^3) hanya sekitar 92% dari berat isi kering maksimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanah tebing berada dalam keadaan tidak padat dan berpotensi mengalami penurunan kekuatan lebih lanjut apabila kadar airnya meningkat.

C. Parameter Kuat Geser

Hasil uji geser langsung pada tiga tingkat beban normal disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3. Regresi linear dengan Persamaan (2) menghasilkan kohesi $c = 2,10 \text{ kN/m}^2$ ($0,0214 \text{ kg/cm}^2$) dan sudut geser dalam $\phi = 30,21^\circ$. Nilai kohesi yang sangat kecil menunjukkan bahwa kuat geser tanah sebagian besar berasal dari gesekan antarbutir, sehingga stabilitas lereng sangat bergantung pada tegangan normal efektif yang dapat berkurang ketika tanah jenuh.

Tabel 2. Hasil Uji Geser Langsung

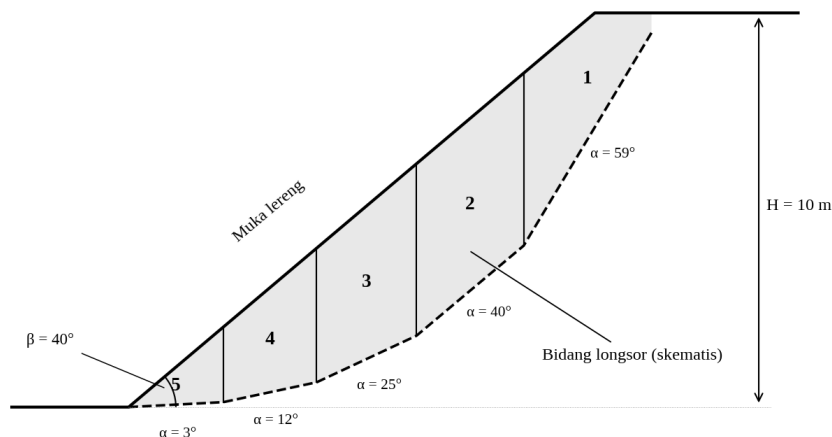
Parameter	P1 = 4 kg	P2 = 8 kg	P3 = 12 kg
Gaya geser maksimum (kg)	3,12	5,07	7,80
Tegangan normal, σ (kN/m^2)	12,26	24,52	36,87
Tegangan geser maksimum, τ (kN/m^2)	9,61	15,59	23,93



Gambar 3. Garis Keruntuhan Mohr–Coulomb dari Hasil Uji Geser Langsung

D. Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Fellenius

Massa tanah di atas bidang longsor dibagi menjadi lima irisan dengan sudut dasar irisan 59° , 40° , 25° , 12° , dan 3° dari puncak ke kaki lereng (Gambar 4). Berat setiap irisan dihitung dari luas irisan dikalikan berat isi tanah 15 kN/m^3 untuk lebar satu meter tegak lurus bidang gambar. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3.



Gambar 4. Skema Pembagian Irisan pada Bidang Longsor Tebing STA 11+800

Tabel 3. Perhitungan Faktor Keamanan Lereng dengan Metode Fellenius

Irisan	Luas (m ²)	W (kN/m)	α (°)	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	ΔL (m)	$W \sin \alpha$ (kN/m)	$W \cos \alpha$ (kN/m)
1	12,10	181,44	59	0,857	0,515	6,30	155,52	93,45
2	12,15	182,20	40	0,643	0,766	3,55	117,12	139,58
3	11,04	165,60	25	0,423	0,906	2,80	69,99	150,08
4	8,36	125,43	12	0,208	0,978	2,42	26,08	122,69
5	3,81	57,20	3	0,052	0,999	2,41	2,99	57,12
Jumlah	47,46	711,87				17,48	371,70	562,91

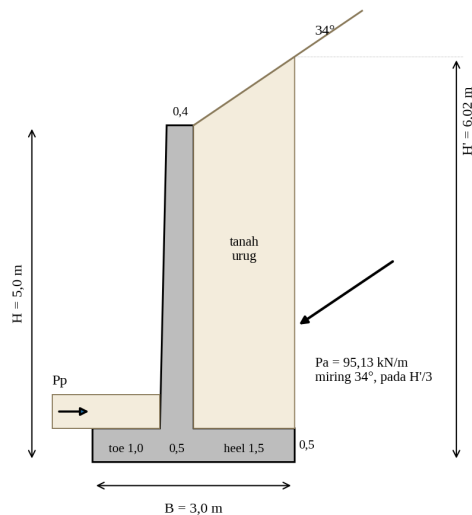
Dengan Persamaan (3), komponen penahan terdiri atas kohesi $c \Sigma \Delta L = 2,10 \times 17,48 = 36,71 \text{ kN/m}$ dan gesekan $\Sigma W \cos \alpha \tan \phi = 562,91 \times \tan 30,21^\circ = 327,72 \text{ kN/m}$, sehingga total gaya penahan sebesar $364,43 \text{ kN/m}$. Gaya pendorong $\Sigma W \sin \alpha$ sebesar $371,70 \text{ kN/m}$. Faktor keamanan lereng adalah $F_s = 364,43 / 371,70 = 0,98$.

Nilai $F_s = 0,98$ lebih kecil dari 1,0 dan jauh di bawah syarat minimum 1,5 [6], sehingga lereng dinyatakan tidak stabil. Hasil ini konsisten dengan kondisi lapangan yang menunjukkan bahwa tebing telah mengalami

kelongsoran. Irisan 1 dan 2 di bagian atas lereng dengan sudut dasar 59° dan 40° menyumbang 73,4% dari total gaya pendorong, sedangkan kontribusi kohesi terhadap gaya penahan hanya 10,1%. Dengan demikian, ketidakstabilan lereng terutama disebabkan oleh kemiringan tebing yang curam pada bagian atas dan rendahnya kohesi tanah.

E. Perencanaan Dinding Penahan Tanah Kantilever

Dinding penahan tanah tipe kantilever direncanakan dengan tinggi total $H = 5$ m, tebal pelat dasar $0,5$ m ($H/10$), lebar dasar $B = 3$ m ($0,6H$), lebar kaki depan (toe) $1,0$ m, lebar tumit (heel) $1,5$ m, tebal dinding bawah $0,5$ m, dan tebal dinding atas $0,4$ m. Timbunan di atas tumit membentuk kemiringan 34° sehingga tinggi total tekanan tanah $H' = 6,02$ m, dengan tanah di depan dinding setinggi $D = 1$ m dan berat isi beton $23,58$ kN/m³ (Gambar 5).



Gambar 5. Dimensi Rencana Dinding Penahan Tanah Tipe Kantilever dan Gaya Tekanan Tanah

Dengan $\phi = 30,21^\circ$, Persamaan (4) menghasilkan $K_p = 3,03$. Koefisien tekanan tanah aktif untuk timbunan miring diambil $K_a = 0,35$, sehingga tekanan tanah aktif $P_a = \frac{1}{2} \times 15 \times 6,02^2 \times 0,35 = 95,13$ kN/m, dengan komponen vertikal $P_v = 53,3$ kN/m dan horizontal $P_h = 78,9$ kN/m. Tekanan tanah pasif di depan dinding $P_p = \frac{1}{2} \times 15 \times 1^2 \times 3,03 + 2 \times 2,10 \times 1 \times \sqrt{3,03} = 30,00$ kN/m. Gaya vertikal dan momen penahan terhadap ujung kaki depan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Gaya Vertikal dan Momen Penahan terhadap Ujung Kaki Depan Dinding

Bagian	Luas (m ²)	Berat (kN/m)	Lengan (m)	Momen (kNm/m)
1 Dinding tegak (segi empat)	1,800	42,44	1,30	55,12
2 Dinding tegak (segitiga)	0,225	5,31	1,07	5,68
3 Pelat dasar	1,500	35,37	1,50	53,05
4 Tanah di atas tumit	6,750	101,25	2,25	227,80
5 Timbunan miring di atas tumit	0,765	11,48	2,50	28,70
Pv (komponen vertikal Pa)	—	53,30	3,00	159,90
Jumlah		249,11		530,25

F. Kontrol Stabilitas Dinding Penahan Tanah

Momen guling akibat komponen horizontal tekanan tanah aktif adalah $\Sigma M_O = 78,9 \times 6,02/3 = 158,33$ kNm/m. Dengan Persamaan (5), faktor keamanan terhadap guling adalah $530,25 / 158,33 = 3,35$. Faktor keamanan terhadap geser adalah $[249,11 \times \tan(20,14^\circ) + 3 \times 0,67 \times 2,10 + 30,00] / 78,9 = 1,59$.

Dengan Persamaan (6), eksentrisitas $e = 1,5 - (530,25 - 158,33)/249,11 = 0,007$ m, jauh lebih kecil dari $B/6 = 0,5$ m, sehingga seluruh dasar pondasi mengalami tekanan dengan $q_{maks} = 84,19$ kN/m² dan $q_{min} = 81,88$ kN/m². Untuk $\phi = 30,21^\circ$ diperoleh $N_q = 18,85$, $N_c = 30,65$, dan $N_\gamma = 23,11$. Kemiringan resultan beban $\psi = \tan^{-1}(78,9/249,11) = 17,6^\circ$ menghasilkan $F_{ci} = F_{qi} = 0,648$ dan $F_{\gamma i} = 0,175$, sedangkan $F_{qd} = 1,096$ dan $F_{cd} = 1,101$. Dengan $q = 15 \times 1 = 15$ kN/m², Persamaan (7) menghasilkan $q_u = 45,9 + 200,6 + 90,5 = 337,0$ kN/m²,

sehingga faktor keamanan terhadap daya dukung adalah $337,0 / 84,19 = 4,00$. Rekapitulasi kontrol stabilitas disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Faktor Keamanan Lereng dan Dinding Penahan Tanah

Kontrol	Hasil Perhitungan	Syarat Minimum	Keterangan
Stabilitas lereng (Fellenius)	0,98	1,5	Tidak aman
Dinding – guling	3,35	2,0	Aman
Dinding – geser	1,59	1,5	Aman
Dinding – daya dukung	4,00	3,0	Aman

G. Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan bahwa tebing pada STA 11+800 berada dalam kondisi tidak stabil ($F_s = 0,98$), yang disebabkan oleh kombinasi kemiringan tebing yang curam (40°), tanah lempung berplastisitas rendah dengan angka pori tinggi, dan kohesi yang sangat kecil. Pada kondisi hujan, peningkatan kadar air akan menambah berat massa tanah sekaligus menurunkan tegangan efektif, sehingga faktor keamanan dapat turun lebih rendah lagi [1], [3].

Dinding penahan tanah kantilever yang direncanakan memenuhi ketiga kontrol stabilitas. Faktor keamanan terhadap guling (3,35) dan daya dukung (4,00) memiliki cadangan yang cukup besar, sedangkan faktor keamanan terhadap geser (1,59) hanya sedikit di atas batas minimum 1,5 sehingga menjadi parameter yang paling menentukan. Stabilitas geser dapat ditingkatkan dengan menambahkan pengunci geser (shear key) di bawah pelat dasar, memperdalam pondasi untuk menambah tahanan pasif, atau memperlebar tumit. Selain itu, kemiringan timbunan di atas tumit (34°) lebih besar daripada sudut geser dalam tanah ($30,21^\circ$), sehingga timbunan sebaiknya dibentuk dengan kemiringan yang lebih landai atau dipadatkan dan dilindungi agar tidak terjadi kelongsoran lokal di atas dinding.

Dinding penahan tanah juga harus dilengkapi sistem drainase berupa lubang sulingan (weep hole) dan lapisan filter di belakang dinding, karena tekanan air yang tidak terdrainase dapat meningkatkan tekanan lateral secara signifikan. Bagian lereng di atas dinding perlu ditangani dengan pelandaian, penanaman vegetasi penutup, dan saluran drainase permukaan untuk mencegah infiltrasi air hujan [5], [7].

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena analisis stabilitas lereng hanya menggunakan satu bidang longsor yang ditentukan dari pengamatan lapangan dan metode Fellenius yang cenderung konservatif. Parameter kuat geser juga diperoleh dari satu seri uji geser langsung tanpa memperhitungkan kondisi jenuh dan tekanan air pori. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan metode Bishop atau Janbu dengan pencarian bidang longsor kritis, analisis pada kondisi jenuh, serta perhitungan penulangan struktur dinding penahan tanah.

IV. Kesimpulan

Tebing pada ruas jalan Malakiri–Karua STA 11+800 memiliki tinggi 10 m, panjang bidang miring 15,5 m, kemiringan 40° , dan panjang longsoran sekitar 25 m. Tanah penyusunnya tergolong A-6(5) menurut AASHTO dan CL menurut USCS, dengan berat jenis 2,69, kadar air 19,57%, berat isi basah $1,50 \text{ g/cm}^3$, batas cair 24,35%, indeks plastisitas 12,26%, lolos saringan No. 200 sebesar 65,32%, kohesi $2,10 \text{ kN/m}^2$, dan sudut geser dalam $30,21^\circ$.

Analisis stabilitas dengan metode Fellenius menghasilkan faktor keamanan 0,98, lebih kecil dari 1,0 dan syarat minimum 1,5, sehingga lereng tidak stabil dan sesuai dengan kelongsoran yang terjadi di lapangan. Ketidakstabilan terutama dipengaruhi oleh kemiringan tebing yang curam pada bagian atas dan rendahnya kohesi tanah.

Dinding penahan tanah tipe kantilever dengan tinggi 5 m, lebar dasar 3 m, tebal pelat dasar 0,5 m, tebal dinding atas 0,4 m, dan tebal dinding bawah 0,5 m menghasilkan faktor keamanan terhadap guling 3,35, geser 1,59, dan daya dukung 4,00, seluruhnya memenuhi persyaratan. Dinding ini dapat diterapkan untuk menanggulangi kelongsoran, dengan saran penambahan pengunci geser, sistem drainase di belakang dinding, dan pelandaian timbunan di atas tumit.

Daftar Pustaka

- [1] D. J. Varnes, "Slope movement types and processes," dalam *Landslides: Analysis and Control*, Special Report 176, R. L. Schuster dan R. J. Krizek, Eds. Washington, DC, USA: Transportation Research Board, 1978, pp. 11–33.
- [2] O. Hungr, S. Leroueil, dan L. Picarelli, "The Varnes classification of landslide types, an update," *Landslides*, vol. 11, no. 2, pp. 167–194, 2014, doi: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- [3] B. M. Das dan K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, ed. ke-9. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.

-
- [4] W. Fellenius, "Calculation of the stability of earth dams," dalam *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, vol. 4, Washington, DC, USA, 1936, pp. 445–462.
 - [5] J. M. Duncan, S. G. Wright, dan T. L. Brandon, *Soil Strength and Slope Stability*, ed. ke-2. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014.
 - [6] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2017.
 - [7] B. M. Das dan N. Sivakugan, *Principles of Foundation Engineering*, ed. ke-9. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2019.
 - [8] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1964:2008 Cara Uji Berat Jenis Tanah; SNI 1966:2008 Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah; SNI 1967:2008 Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah; SNI 1742:2008 Cara Uji Kepadatan Ringan untuk Tanah*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2008.
 - [9] *ASTM D3080/D3080M-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2011.
 - [10] *AASHTO M 145-91 Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. Washington, DC, USA: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
 - [11] *ASTM D2487-17 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
 - [12] K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1943.
 - [13] A. S. Vesić, "Analysis of ultimate loads of shallow foundations," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 99, no. SM1, pp. 45–73, 1973.