

Evaluasi Stabilitas Lereng dan Perancangan Ulang Dinding Penahan Tanah Tipe Gravitasi pada Longsoran Jalan Poros Salu–Dende, Lembang Salu Sarre, Kabupaten Toraja Utara

Irpan Palalang¹, Melawanti²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jalan Nusantara No. 120, Makale Tana Toraja, 91811, Indonesia

corresponding author : irpanpalalang@gmail.com

ABSTRAK

Kata Kunci:

Stabilitas Lereng
Kohesi Semu
Dinding Penahan Tanah
Tipe Gravitasi
Penggantian Tanah Dasar

Longsoran pada jalan poros Salu–Dende di Lembang Salu Sarre, Kecamatan Sopai, Kabupaten Toraja Utara, terjadi pada musim hujan dan mengganggu arus lalu lintas. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik tanah, menganalisis stabilitas lereng pada kondisi kering dan jenuh, mengevaluasi rancangan awal dinding penahan tanah tipe gravitasi, dan merancang ulang dimensinya agar memenuhi persyaratan stabilitas. Data diperoleh dari pengukuran geometri longsoran dan pengujian laboratorium terhadap sampel tanah. Stabilitas lereng dianalisis dengan metode baji bidang datar, sedangkan dinding dianalisis dengan teori tekanan tanah Rankine dan Coulomb serta persamaan daya dukung umum. Tanah merupakan pasir bergradasi baik (SW; A-1-b) dengan lolos saringan No. 200 sebesar 4,46%, berat isi 9,02 kN/m³, porositas 79,5%, kohesi 8,96 kPa, dan sudut geser dalam 9,55°. Lereng setinggi 5 m dengan kemiringan 28,4° memiliki faktor keamanan 6,38 pada kondisi kering, tetapi turun menjadi 0,38 apabila kohesi hilang pada kondisi jenuh; kohesi minimum yang diperlukan agar FS = 1,5 adalah 2,43 kPa. Rancangan awal dinding gravitasi setinggi 5,6 m dengan lebar dasar 2,4 m tidak aman terhadap geser (FS = 0,23–0,39), guling (0,88–1,82), dan daya dukung (< 1,0). Rancangan ulang dengan lebar dasar 3,5 m, lebar puncak 0,5 m, timbunan granular berdrainase, dan penggantian tanah dasar dengan batu pecah setebal 1,5 m menghasilkan faktor keamanan terhadap geser 1,57, guling 3,61, dan daya dukung 9,19. Namun, faktor keamanan tanah asli di bawah lapisan pengganti hanya 1,62, sehingga parameter kuat geser tanah perlu diverifikasi sebelum pelaksanaan.

Keywords:

Slope Stability
Apparent Cohesion
Retaining Wall
Gravity Type
Foundation Replacement

ABSTRACT

A landslide on the Salu–Dende road in Lembang Salu Sarre, Sopai District, North Toraja Regency, occurs during the rainy season and disrupts traffic. This study aims to identify the soil characteristics, analyze slope stability under dry and saturated conditions, evaluate the initial design of a gravity retaining wall, and redesign its dimensions to satisfy stability requirements. Data were obtained from field measurements of the landslide geometry and laboratory tests on soil samples. Slope stability was analyzed using the planar wedge method, while the wall was analyzed using Rankine and Coulomb earth pressure theories and the general bearing capacity equation. The soil is a well-graded sand (SW; A-1-b) with 4.46% passing the No. 200 sieve, a unit weight of 9.02 kN/m³, a porosity of 79.5%, a cohesion of 8.96 kPa, and an internal friction angle of 9.55°. The 5 m high slope inclined at 28.4° has a factor of safety of 6.38 in the dry condition, but this drops to 0.38 when cohesion is lost under saturation; the minimum cohesion required for FS = 1.5 is 2.43 kPa. The initial gravity wall design, 5.6 m high with a 2.4 m base width, is unsafe against sliding (FS = 0.23–0.39), overturning (0.88–1.82), and bearing capacity (< 1.0). The redesign with a 3.5 m base width, a 0.5 m top width, drained granular backfill, and 1.5 m crushed-stone foundation replacement yields factors of safety against sliding, overturning, and bearing capacity of 1.57, 3.61, and 9.19, respectively. However, the factor of safety of the native soil beneath the replacement layer is only 1.62, so the soil shear strength parameters must be verified before construction.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) 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], [2]. Di daerah pegunungan, kelongsoran paling sering terjadi pada musim hujan karena infiltrasi air meningkatkan berat massa tanah, menaikkan tekanan air pori, dan menurunkan kuat geser tanah [3]. Pada tanah berbutir kasar dalam kondisi tidak jenuh, sebagian kuat geser berasal dari kohesi semu akibat isapan matriks (matric suction) yang dapat hilang ketika tanah menjadi jenuh [4].

Evaluasi stabilitas lereng dilakukan dengan membandingkan gaya penahan dan gaya pendorong pada bidang longsor menggunakan metode keseimbangan batas [3], [5], dan hasilnya dibandingkan dengan faktor keamanan minimum dalam standar perancangan geoteknik [6]. Apabila lereng tidak stabil, salah satu upaya penanggulangan yang umum digunakan adalah dinding penahan tanah. Dinding tipe gravitasi dari pasangan batu mengandalkan berat sendiri untuk menahan tekanan tanah lateral, sehingga stabilitasnya terhadap geser, guling, dan daya dukung sangat dipengaruhi oleh parameter tanah timbunan maupun tanah dasar [7].

Jalan poros Salu–Dende di Lembang Salu Sarre, Kecamatan Sopai, Kabupaten Toraja Utara, berada pada daerah berkontur miring dan mengalami kelongsoran lereng setinggi sekitar 5 m yang mengganggu arus lalu lintas. Pada lokasi ini telah disusun rancangan awal dinding penahan tanah tipe gravitasi setinggi 5,6 m dengan lebar dasar 2,4 m. Penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi karakteristik fisik dan mekanis tanah; (2) menganalisis stabilitas lereng pada kondisi kering dan jenuh; (3) mengevaluasi stabilitas rancangan awal dinding gravitasi menggunakan parameter tanah hasil uji laboratorium; dan (4) merancang ulang dimensi dinding beserta ketentuan pendukungnya agar memenuhi persyaratan stabilitas.

II. Metode Penelitian

A. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada jalan poros Salu–Dende, Lembang Salu Sarre, Kecamatan Sopai, Kabupaten Toraja Utara, Provinsi Sulawesi Selatan, pada koordinat $2^{\circ}57'10,6''$ LS dan $119^{\circ}55'17,8''$ BT. Kondisi longsor dan lokasi pengambilan sampel tanah ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Kondisi Longsor Lereng pada Jalan Poros Salu–Dende; (b) Lokasi Pengambilan Sampel Tanah

B. Pengumpulan Data

Geometri longsor diukur langsung di lapangan, meliputi panjang bidang miring lereng, tinggi lereng, dan jarak retakan di puncak lereng. Sampel tanah diambil dari lokasi longsor dan diuji di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Kristen Indonesia Toraja. Pengujian meliputi berat jenis, kadar air dan berat isi, batas-batas Atterberg, analisis saringan, pemadatan standar [8], dan geser langsung [9]. Tanah diklasifikasikan menurut sistem AASHTO [10] dan USCS [11].

C. Analisis Data

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

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

Parameter kuat geser ditentukan dari regresi linear tegangan geser maksimum terhadap tegangan normal hasil uji geser langsung, $\tau = c + \sigma \tan \phi$ [3]. Karena bidang longsor di lapangan mendekati garis lurus dari kaki lereng ke retakan di puncak, stabilitas lereng dianalisis dengan metode baji bidang datar [3]:

$$FS = [c L + W \cos \theta \tan \phi] / [W \sin \theta] \quad (2)$$

dengan L adalah panjang bidang longsor, W adalah berat baji per meter lebar, dan θ adalah sudut bidang longsor. Analisis dilakukan untuk kondisi lapangan ($\gamma = 9,02 \text{ kN/m}^3$) dan kondisi jenuh (γ_{sat}) dengan kohesi utuh, berkurang 50%, dan hilang seluruhnya. Lereng dinyatakan aman apabila $FS \geq 1,5$ [6].

Tekanan tanah aktif pada dinding dihitung dengan teori Rankine untuk timbunan tanah asli dan teori Coulomb untuk timbunan granular dengan sudut gesek dinding $\delta = 2\phi/3$ [7], [12]. Untuk dinding dengan bidang belakang tegak dan permukaan timbunan datar:

$$K_a = \cos^2 \phi / \{ \cos \delta [1 + \sqrt{(\sin(\phi + \delta) \sin \phi / \cos \delta)}]^2 \} \quad P_a = (\frac{1}{2} \gamma H^2 + q H) K_a \quad (3)$$

dengan q adalah beban merata lalu lintas sebesar 10 kN/m^2 . Stabilitas terhadap geser dan guling dihitung dengan [7]:

$$FS_{\text{geser}} = [\Sigma V \tan \delta_b + c_a B + P_p] / P_h \quad FS_{\text{guling}} = \Sigma M_R / \Sigma M_O \quad (4)$$

dengan $\delta_b = 2\phi_b/3$ dan $c_a = 2c_b/3$ adalah parameter gesekan dan adhesi pada dasar dinding. Eksentrisitas, tegangan kontak, dan daya dukung ultimit dihitung dengan persamaan daya dukung umum [7], [13]:

$$e = B/2 - (\Sigma M_R - \Sigma M_O) / \Sigma V \quad q_{\text{maks,min}} = (\Sigma V / B)(1 \pm 6e/B) \quad (5)$$

$$q_u = c N_c F_{cd} F_{ci} + q N_q F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma B' N_\gamma F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad FS_{\text{daya dukung}} = q_u / q_{\text{maks}} \quad (6)$$

dengan $B' = B - 2|e|$, $N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2(45^\circ + \phi/2)$, $N_c = (N_q - 1) \cot \phi$, dan $N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan \phi$. Berat isi pasangan batu diambil 22 kN/m^3 [14]. Faktor keamanan minimum adalah 1,5 untuk geser, 2,0 untuk guling, dan 3,0 untuk daya dukung [6], [7].

III. Hasil dan Pembahasan

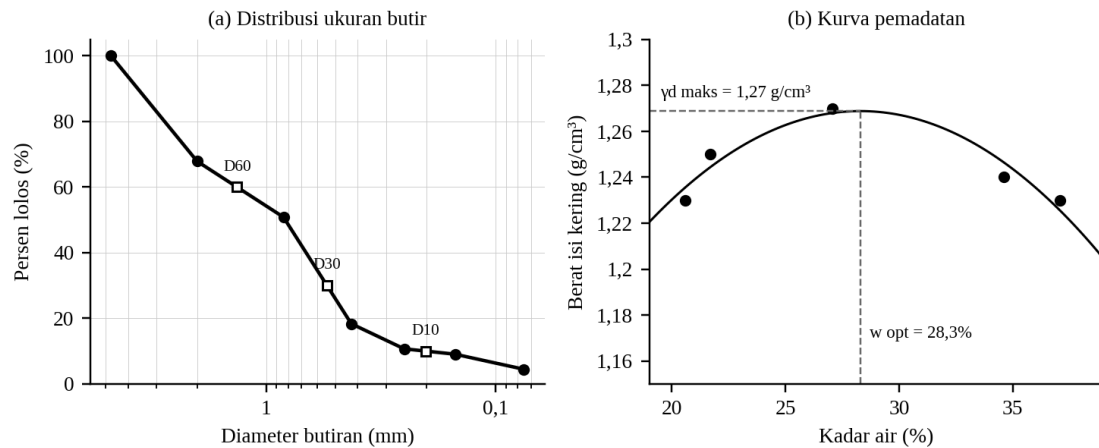
A. Karakteristik Tanah

Hasil pengujian sifat fisik dan mekanis tanah disajikan pada Tabel 1. Tanah memiliki berat jenis 2,63, kadar air 75,5%, dan berat isi basah $0,92 \text{ g/cm}^3$ ($9,02 \text{ kN/m}^3$). Dengan Persamaan (1), berat isi kering adalah $0,54 \text{ g/cm}^3$, angka pori 3,88, porositas 79,5%, derajat kejenuhan 51,1%, dan berat isi jenuh $13,09 \text{ kN/m}^3$. Porositas yang sangat tinggi menunjukkan struktur tanah yang sangat lepas, sehingga tanah mudah menyerap air hujan dan mengalami penambahan berat yang besar ketika jenuh.

Tabel 1. Sifat Fisik dan Mekanis Tanah Lokasi Longsoran

Parameter	Nilai	Satuan
Berat jenis (Gs)	2,63	—
Kadar air lapangan (w)	75,5	%
Berat isi basah (γ_b)	0,92 (9,02)	g/cm^3 (kN/m^3)
Berat isi kering (γ_d)	0,54	g/cm^3
Angka pori (e) / porositas (n)	3,88 / 79,5	— / %
Derajat kejenuhan (Sr)	51,1	%
Berat isi jenuh (γ_{sat})	13,09	kN/m^3
Batas cair / batas plastis / indeks plastisitas	51,44 / 46,39 / 5,05	%
Batas susut (SL)	14,93	%
Lolos saringan No. 10 / No. 40 / No. 200	67,86 / 18,34 / 4,46	%
Cu / Cc	6,66 / 1,10	—
Kadar air optimum / γ_d maksimum	28,3 / 1,27	% / g/cm^3
Kohesi (c)	8,96	kPa
Sudut geser dalam (ϕ)	9,55	°
Klasifikasi USCS / AASHTO	SW / A-1-b	—

Distribusi ukuran butir dan kurva pemadatan disajikan pada Gambar 2. Seluruh butiran lolos saringan No. 4 dan hanya 4,46% yang lolos saringan No. 200, sehingga tanah merupakan tanah berbutir kasar. Dengan $D_{10} = 0,20 \text{ mm}$, $D_{30} = 0,54 \text{ mm}$, dan $D_{60} = 1,34 \text{ mm}$, diperoleh koefisien keseragaman $C_u = 6,66$ dan koefisien gradasi $C_c = 1,10$, sehingga tanah tergolong pasir bergradasi baik (SW) menurut USCS [11]. Dengan lolos saringan No. 40 sebesar 18,34% dan indeks plastisitas 5,05%, tanah tergolong A-1-b menurut AASHTO [10]. Uji pemadatan menghasilkan kadar air optimum 28,3% dan berat isi kering maksimum $1,27 \text{ g/cm}^3$.

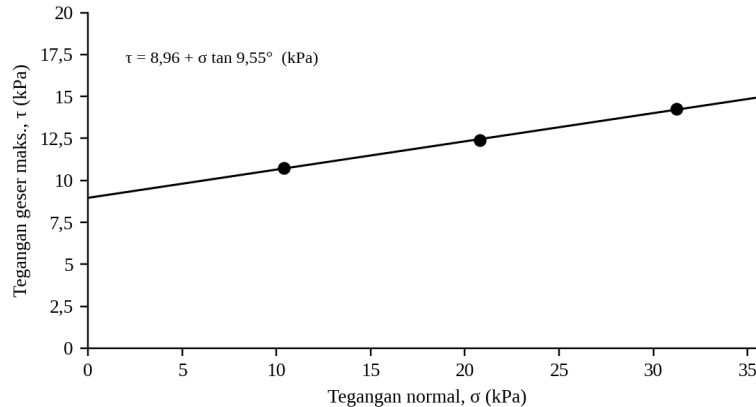


Gambar 2. (a) Kurva Distribusi Ukuran Butir dan (b) Kurva Pemadatan Tanah

Hasil uji geser langsung disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 3. Regresi linear menghasilkan kohesi $c = 8,96$ kPa ($0,091 \text{ kg/cm}^2$) dan sudut geser dalam $\phi = 9,55^\circ$. Untuk tanah pasir, kohesi tersebut merupakan kohesi semu akibat isapan matriks pada kondisi tidak jenuh [4], sedangkan sudut geser dalam $9,55^\circ$ jauh lebih rendah daripada nilai umum pasir, yang kemungkinan dipengaruhi oleh struktur tanah yang sangat lepas dan kondisi pengujian.

Tabel 2. Hasil Uji Geser Langsung

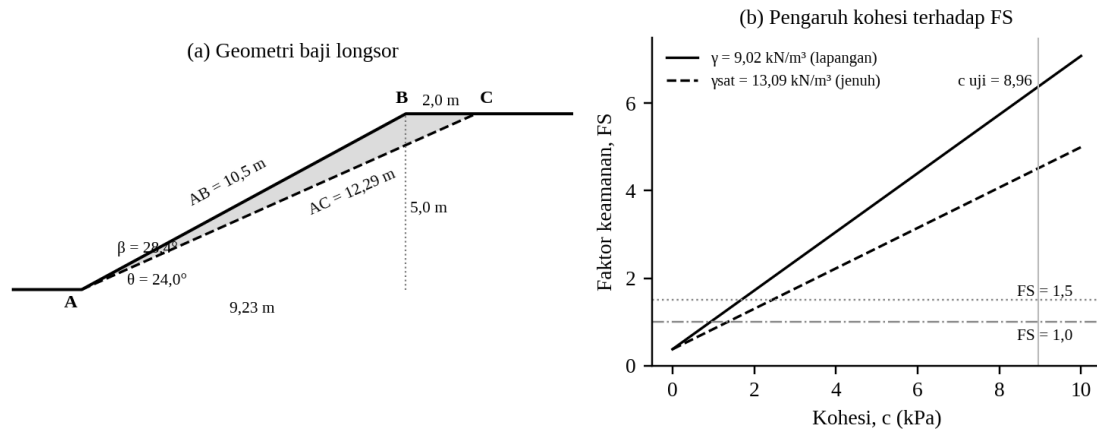
Parameter	P1 = 3 kg	P2 = 6 kg	P3 = 9 kg
Gaya geser maksimum (kg)	3,10	3,57	4,11
Tegangan normal, σ (kPa)	10,41	20,81	31,22
Tegangan geser maksimum, τ (kPa)	10,75	12,38	14,26



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

B. Stabilitas Lereng

Hasil pengukuran lapangan menunjukkan panjang bidang miring lereng AB = 10,5 m, tinggi lereng 5,0 m, dan retakan di puncak lereng berjarak 2,0 m dari bibir lereng. Sudut kemiringan lereng adalah $\beta = \arcsin(5/10,5) = 28,4^\circ$ dengan panjang horizontal 9,23 m. Bidang longsor dari kaki lereng (A) ke retakan (C) memiliki panjang $L = 12,29$ m dan sudut $\theta = 24,0^\circ$, dengan luas baji $5,0 \text{ m}^2$ per meter lebar (Gambar 4a).



Gambar 4. (a) Geometri Baji Longsor dan (b) Pengaruh Kohesi terhadap Faktor Keamanan Lereng

Hasil analisis stabilitas dengan Persamaan (2) disajikan pada Tabel 3. Pada kondisi lapangan dengan kohesi utuh, faktor keamanan sebesar 6,38, dan pada kondisi jenuh dengan kohesi utuh sebesar 4,52, sehingga lereng tergolong aman. Namun, ketika kohesi berkurang 50% faktor keamanan turun menjadi 2,45, dan ketika kohesi hilang seluruhnya faktor keamanan hanya 0,38. Kohesi minimum yang diperlukan agar $FS = 1,5$ adalah 1,67 kPa pada kondisi lapangan dan 2,43 kPa pada kondisi jenuh (Gambar 4b).

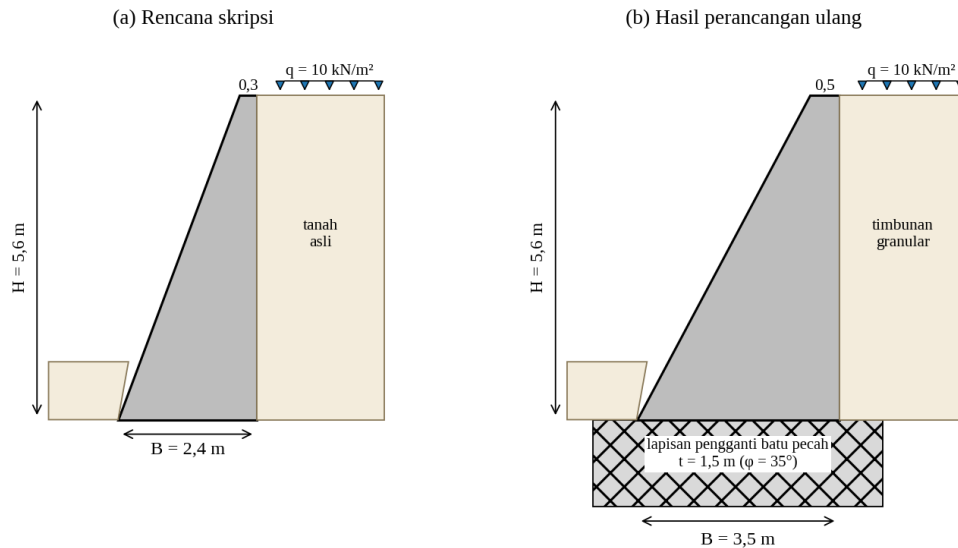
Tabel 3. Faktor Keamanan Lereng Metode Baji Bidang Datar ($L = 12,29 \text{ m}$; $\theta = 24,0^\circ$)

Kondisi	γ (kN/m ³)	c (kPa)	W (kN/m)	FS
Lapangan, kohesi utuh	9,02	8,96	45,10	6,38
Jenuh, kohesi utuh	13,09	8,96	65,43	4,52
Jenuh, kohesi berkurang 50%	13,09	4,48	65,43	2,45
Jenuh, kohesi hilang	13,09	0,00	65,43	0,38
Kohesi kritis $FS = 1,5$ (lapangan / jenuh)	–	1,67 / 2,43	–	1,50

Hasil ini menunjukkan bahwa stabilitas lereng hampir sepenuhnya bergantung pada kohesi. Karena kohesi pada tanah pasir bersifat semu dan hilang ketika tanah jenuh oleh air hujan [4], penurunan kohesi tersebut menjadi mekanisme yang paling mungkin memicu kelongsoran pada musim hujan, sesuai dengan kejadian di lapangan.

C. Evaluasi Rancangan Awal Dinding Gravitasi

Rancangan awal dinding gravitasi memiliki tinggi $H = 5,6 \text{ m}$, lebar puncak $0,3 \text{ m}$, dan lebar dasar $B = 2,4 \text{ m}$ (Gambar 5a). Evaluasi dilakukan untuk dua kondisi: (E1) timbunan berupa tanah asli ($\phi = 9,55^\circ$, $\gamma = 9,02 \text{ kN/m}^3$, kohesi diabaikan karena dapat hilang saat jenuh) dengan K_a Rankine = 0,715; dan (E2) timbunan berupa material granular ($\phi = 30^\circ$, $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$) dengan K_a Coulomb = 0,297. Pada kedua kondisi, dinding berdiri di atas tanah asli. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.



Gambar 5. Penampang Dinding Penahan Tanah Tipe Gravitasi: (a) Rancangan Awal dan (b) Hasil Perancangan Ulang

Pada kondisi E1, tekanan tanah horizontal mencapai 141,24 kN/m, jauh melampaui kemampuan dinding seberat 166,32 kN/m. Faktor keamanan terhadap geser hanya 0,23 dan terhadap guling 0,88, dengan eksentrisitas 1,42 m yang melebihi setengah lebar dasar sehingga resultan gaya jatuh di luar dasar dinding. Pada kondisi E2, penggunaan timbunan granular menurunkan tekanan horizontal menjadi 94,50 kN/m, tetapi faktor keamanan terhadap geser (0,39) dan guling (1,82) tetap di bawah syarat, eksentrisitas 0,42 m melebihi $B/6 = 0,40$ m, dan daya dukung tanah asli ($q_u = 56,4$ kPa) jauh lebih kecil daripada tegangan kontak maksimum 172,2 kPa. Dengan demikian, rancangan awal tidak aman, terutama karena kuat geser tanah dasar yang rendah.

Tabel 4. Rekapitulasi Stabilitas Rancangan Awal dan Rancangan Ulang Dinding Gravitasi

Kondisi	Ph (kN/m)	ΣV (kN/m)	FS geser ($\geq 1,5$)	FS guling ($\geq 2,0$)	e (m)	FS daya dukung ($\geq 3,0$)
E1: B = 2,4 m, timbunan tanah asli	141,24	166,32	0,23	0,88	1,42	< 0,1
E2: B = 2,4 m, timbunan granular	94,50	200,71	0,39	1,82	0,42	0,33
Rancangan ulang: B = 3,5 m	94,50	280,79	1,57	3,61	-0,03	9,19

D. Perancangan Ulang Dinding Gravitasi

Karena tanah asli tidak mampu menyediakan tahanan geser dan daya dukung yang cukup, perancangan ulang dilakukan dengan tiga ketentuan: (1) timbunan di belakang dinding diganti dengan material granular berdrainase ($\phi = 30^\circ$, $\gamma = 18$ kN/m³) yang dilengkapi lubang sulingan; (2) tanah di bawah dasar dinding diganti dengan batu pecah yang dipadatkan setebal 1,5 m ($\phi = 35^\circ$, $\gamma = 19$ kN/m³) dan diperlebar 0,75 m di setiap sisi; dan (3) dimensi dinding diperbesar. Dengan menelusuri lebar dasar dari 3,0 m hingga 4,5 m, lebar dasar 3,25 m menghasilkan faktor keamanan geser tepat 1,50, sehingga dipilih B = 3,5 m dengan lebar puncak 0,5 m untuk memberikan cadangan keamanan (Gambar 5b). Rincian gaya dan momen disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Gaya Vertikal dan Momen Penahan Dinding Hasil Perancangan Ulang terhadap Ujung Kaki Depan

Bagian	Luas (m ²)	Berat (kN/m)	Lengan (m)	Momen (kNm/m)
Badan dinding persegi ($0,5 \times 5,6$)	2,80	61,60	3,25	200,20
Badan dinding segitiga ($3,0 \times 5,6 / 2$)	8,40	184,80	2,00	369,60
Komponen vertikal Pa (Pv)	—	34,39	3,50	120,38
Jumlah		280,79		690,18

Dengan $K_a = 0,297$, tekanan tanah aktif akibat timbunan dan beban merata masing-masing 83,91 kN/m dan 16,65 kN/m, dengan komponen horizontal total $P_h = 94,50$ kN/m dan momen guling $\Sigma M_O = 191,00$ kNm/m. Tekanan pasif tanah asli di depan dinding setinggi 1,0 m sebesar 27,49 kN/m. Dengan Persamaan (4), faktor keamanan terhadap geser adalah $(280,79 \times \tan 23,3^\circ + 27,49)/94,50 = 1,57$ dan terhadap guling $690,18/191,00 = 3,61$.

Dengan Persamaan (5), eksentrisitas $e = -0,03$ m sehingga resultan berada hampir di tengah dasar dinding, dengan tegangan kontak 76,4–84,0 kPa. Untuk lapisan batu pecah ($\phi = 35^\circ$) diperoleh $N_q = 33,30$ dan $N_\gamma = 48,03$, dan dengan faktor kemiringan beban akibat $\psi = 18,6^\circ$, Persamaan (6) menghasilkan $q_u = 772,2$ kPa sehingga faktor keamanan terhadap daya dukung adalah 9,19. Hasil ini dibandingkan dengan rancangan awal pada Tabel 4.

Daya dukung tanah asli di bawah lapisan pengganti juga diperiksa dengan menganggap beban menyebar 2V:1H melalui lapisan batu pecah. Pada kedalaman 2,5 m, tegangan yang bekerja sebesar 85,3 kPa, sedangkan daya dukung ultimit tanah asli dengan $c = 8,96$ kPa dan $\phi = 9,55^\circ$ sebesar 138,6 kPa, sehingga faktor keamanannya hanya 1,62. Penambahan tebal lapisan pengganti menjadi 3,0 m hanya meningkatkan faktor keamanan menjadi 2,22. Dengan demikian, apabila parameter kuat geser hasil uji laboratorium mewakili kondisi tanah sebenarnya, fondasi dangkal tidak cukup dan dinding perlu didukung fondasi dalam, misalnya tiang bor.

E. Pembahasan

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa longsor pada lokasi ini dikendalikan oleh hilangnya kohesi semu tanah pasir yang sangat lepas ketika jenuh. Penanggulangan oleh karena itu tidak cukup hanya dengan struktur penahan, tetapi juga memerlukan pengendalian air berupa saluran drainase permukaan di puncak lereng, penutupan retakan, dan sistem drainase di belakang dinding agar timbunan tidak jenuh [3], [5].

Rancangan awal dinding gravitasi tidak memenuhi persyaratan karena menggunakan parameter tanah yang tidak sesuai dengan hasil uji laboratorium. Rancangan ulang dengan lebar dasar 3,5 m memenuhi kontrol geser, guling, dan daya dukung pada lapisan pengganti, dengan stabilitas geser sebagai parameter yang paling menentukan. Namun, keamanan tanah asli di bawah lapisan pengganti sangat bergantung pada sudut geser dalam tanah. Sudut geser dalam $9,55^\circ$ tidak lazim untuk pasir bergradasi baik, dan uji batas cair menunjukkan kadar air yang meningkat seiring bertambahnya jumlah pukulan, yang berlawanan dengan perilaku normal. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian hasil uji laboratorium perlu diverifikasi.

Penelitian lanjutan disarankan melakukan pengujian ulang kuat geser dengan uji triaksial, pengujian berat isi dengan sampel tidak terganggu, serta penyelidikan lapangan berupa sondir atau SPT untuk menentukan kedalaman tanah keras. Apabila hasil verifikasi menunjukkan sudut geser dalam yang lebih besar, rancangan ulang dengan fondasi dangkal pada lapisan pengganti dapat digunakan; sebaliknya, apabila parameter tetap rendah, dinding perlu didukung fondasi tiang.

IV. Kesimpulan

Tanah pada lokasi longsor jalan poros Salu–Dende merupakan pasir bergradasi baik (SW; A-1-b) yang sangat lepas, dengan berat isi 9,02 kN/m³, porositas 79,5%, lolos saringan No. 200 sebesar 4,46%, kohesi 8,96 kPa, dan sudut geser dalam $9,55^\circ$. Lereng setinggi 5 m dengan kemiringan $28,4^\circ$ stabil pada kondisi kering (FS = 6,38), tetapi faktor keamanannya turun menjadi 0,38 apabila kohesi semu hilang pada kondisi jenuh, sehingga hilangnya kohesi akibat hujan merupakan pemicu utama longsor.

Rancangan awal dinding gravitasi setinggi 5,6 m dengan lebar dasar 2,4 m tidak aman terhadap geser (FS = 0,23–0,39), guling (0,88–1,82), maupun daya dukung. Rancangan ulang dengan lebar dasar 3,5 m, lebar puncak 0,5 m, timbunan granular berdrainase, dan penggantian tanah dasar dengan batu pecah setebal 1,5 m menghasilkan faktor keamanan terhadap geser 1,57, guling 3,61, dan daya dukung 9,19, seluruhnya memenuhi persyaratan.

Faktor keamanan tanah asli di bawah lapisan pengganti hanya 1,62 dengan parameter hasil uji laboratorium, sehingga parameter kuat geser tanah perlu diverifikasi dengan uji triaksial dan penyelidikan lapangan sebelum pelaksanaan. Apabila parameter tersebut terkonfirmasi, dinding perlu didukung fondasi dalam. Sistem drainase permukaan dan drainase di belakang dinding wajib disediakan untuk mencegah tanah menjadi jenuh.

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] D. G. Fredlund dan H. Rahardjo, *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1993.
 - [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 3423:2008 Cara Uji Analisis Ukuran Butir 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] C. A. Coulomb, "Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture," *Mémoires de Mathématique et de Physique, Académie Royale des Sciences*, vol. 7, pp. 343–382, 1776.
 - [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.
 - [14] Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, *Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung 1983*. Bandung, Indonesia: Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, 1983.