

Back Analysis dan Validasi Numerik-Manual Parameter Residual Soil: Studi Kasus Longsoran Bendungan Bagong

Muhammad Rizqi Uwais Al Qorni*, Kresno Wikan Sadono, Sukamta
Magister Teknik Sipil, Universitas Diponegoro Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

back analysis; limestone terlapuk; residual soil; parameter geoteknik; controlling factor; cross-method validation; stabilitas bendungan.

***Correspondence email:**

rizqiuwais@students.undip.ac.id

Submitted: 15 Januari 2025

Revised: 24 Januari 2026

Accepted: 24 Januari 2026

Published: 04 Februari 2026

ABSTRAK

Longsoran pada sandaran kiri Bendungan Bagong pada 14 Agustus 2025 mengindikasikan gap signifikan antara parameter desain dan kondisi lapangan aktual, khususnya pada zona kritis material limestone terlapuk dan residual soil (RQD = 0-11%). Penelitian ini bertujuan memvalidasi parameter geoteknik sandaran bendungan melalui *back analysis* terhadap longsoran aktual dan merumuskan rekomendasi desain geometri lereng yang aman. Metode penelitian menggunakan pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan karakterisasi geologi berbasis 6 titik bor, *back analysis parametrized* dengan 10 referensi material geologi serupa, validasi *cross-method* antara *Limit Equilibrium* (Metode *Fellenius* manual) dan *finite element method (PLAXIS LE)*, validasi GSI-Hoek Brown untuk zona batuan terlapuk, serta analisis sensitivitas parameter. Hasil penelitian menunjukkan parameter tervalidasi $c = 35,5$ kPa dan $\phi = 23^\circ$ merepresentasikan kondisi lapangan kritis dengan faktor keamanan $FS = 1,173$ (*PLAXIS LE*) dan $FS = 1,2588$ (Metode *Fellenius*), dengan deviasi antar metode 7,32%. Analisis sensitivitas mengidentifikasi *pore pressure ratio (Ru)* sebagai *controlling factor* dominan ($\Delta FS/\Delta Ru = -0,155$), yang menjelaskan mekanisme kegagalan saat musim hujan. Rekomendasi desain optimal adalah geometri bertingkat dengan *berm* tunggal pada elevasi 320 m dan kemiringan 33° , menghasilkan $FS = 1,629$ yang memenuhi kriteria keamanan konstruksi ($FS \geq 1,35$), dengan peningkatan stabilitas 38,8% dibanding kondisi eksisting.

ABSTRACT

Keywords:

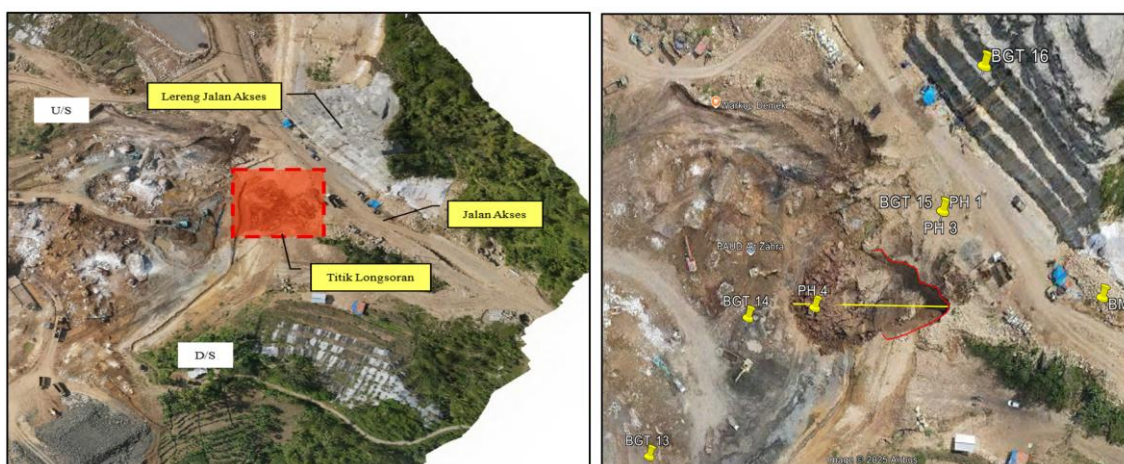
back analysis; weathered limestone; residual soil; geotechnical parameters; controlling factor; cross-method validation; dam stability.

A landslide on the left abutment of the Bagong Dam on 14 August 2025 indicated a significant gap between the design parameters and the actual field conditions, particularly within the critical zone of weathered limestone and residual soil (RQD = 0–11%). This study aims to validate the geotechnical parameters of the dam abutment through back analysis of the actual landslide and to formulate safe slope geometry design recommendations. A comprehensive research methodology is employed, integrating geological characterization based on six boreholes, parametrized back analysis using ten reference materials with similar geological conditions, cross-method validation between the Limit Equilibrium method (manual Fellenius method) and the finite element method (PLAXIS LE), GSI–Hoek–Brown validation for weathered rock zones, and parameter sensitivity analysis. The results show that the validated parameters $c = 35,5$ kPa and $\phi = 23^\circ$ represent the critical field conditions, yielding safety factors of $FS = 1,173$ (PLAXIS LE) and $FS = 1,2588$ (Fellenius method), with an inter-method deviation of 7,32%. Sensitivity analysis identifies the pore pressure ratio (Ru) as the dominant controlling factor ($\Delta FS/\Delta Ru = -0,155$), explaining the failure mechanism during the rainy season. The optimal design recommendation is a stepped slope geometry with a single berm at elevation 320 m and a slope angle of 33° , resulting in $FS = 1,629$, which satisfies construction safety criteria ($FS \geq 1,35$) and represents a 38,8% increase in stability compared with the existing condition.

PENDAHULUAN

Bendungan Bagong di Kabupaten Trenggalek, Jawa Timur, merupakan infrastruktur pengairan strategis untuk pengaturan aliran sungai Ngrowo-Ngasinan, penyediaan air baku, irigasi pertanian, dan pengendalian banjir dalam kawasan dengan curah hujan tinggi. Sebagai bangunan tipe zonasi urugan batu dengan inti tegak, stabilitas *abutment* (sandaran) merupakan elemen kritis yang mengendalikan integritas struktural bendungan selama periode konstruksi dan operasional. Berdasarkan laporan geologi Brantas River Basin Organization (BBWS Brantas) (2024) karakteristik geologi lokasi bendungan ditandai dengan formasi batuan kalkarenit dan endapan residu berlapis kompleks, menciptakan kondisi *subsurface* yang sangat heterogen dengan material *limestone* terlapuk sempurna (*Grade V-VI*) dan *residual soil* pada zona kritis, material yang telah kehilangan struktur batuan asli dan tidak dapat dikarakterisasi secara akurat melalui pengujian laboratorium konvensional.

Pada tanggal 14 Agustus 2025 pukul 02.00 WIB, terjadi longsoran aktual pada area sandaran kiri Bendungan Bagong, lokasi maindam dengan elevasi mahkota longsor 330 m dan kaki lereng 280 m seperti pada Gambar 1, meskipun penggalian telah dilaksanakan sesuai rencana desain awal. Kejadian longsoran ini mengindikasikan gap signifikan antara parameter geoteknik yang digunakan dalam desain dan kondisi *massa* batuan aktual di lapangan. Gap terjadi karena zona kritis dengan material *limestone* terlapuk sempurna (*Grade V-VI*) dan *residual soil* berlapis tidak dapat diuji laboratorium secara langsung, sehingga parameter kuat geser (kohesi c dan sudut geser dalam ϕ) hanya didasarkan estimasi empiris tanpa validasi lapangan. Kejadian ini menyoroti urgensi untuk melakukan investigasi mendalam guna mengidentifikasi penyebab kegagalan, merekalkulasi parameter geoteknik *subsurface* berdasarkan longsoran aktual, dan merumuskan desain geometri lereng sandaran yang aman dan andal.



Gambar 1. Dokumentasi udara longsoran pada sandaran kiri

Sumber: BBWS Brantas (2025)

Penelitian sejenis yang dilakukan Satya et al. (2022) pada bendungan dengan kondisi geologi serupa menunjukkan pentingnya *back analysis* sebagai metode validasi parameter geoteknik pada kondisi data laboratorium terbatas. Khabbaz et al. (2012) dalam studi komparatif antara metode *Limit Equilibrium* dan *finite element method* menunjukkan bahwa deviasi kedua metode pada kondisi *semi-drained* berkisar 5-10%, sehingga validasi *cross method* dapat memperkuat kredibilitas parameter yang diperoleh. Duncan (1996) secara eksplisit menekankan bahwa metode *Fellenius (ordinary method of slices)* dapat memberikan estimasi yang berlebihan terhadap faktor keamanan pada lereng dengan geometri landai dan tekanan air pori tinggi, sehingga verifikasi menggunakan *finite element method* menjadi penting untuk kondisi geologi kompleks. Lebih lanjut, C Wyllie & W Mah (1981) menyatakan bahwa untuk material *residual soil* dan *limestone* terlapuk pada bendungan, drainage system merupakan *the most effective and economical method* untuk meningkatkan stabilitas dibanding *soil stabilization* murni atau *retaining structures*. Studi terbaru oleh Indrawan et al. (2024) pada Bendungan Leuwikeris menunjukkan bahwa validasi *cross-method* antara *Limit Equilibrium* dan *Finite Element method* menghasilkan deviasi kurang dari 14% pada kondisi statik, namun meningkat hingga 78% pada kondisi pseudostatik, menekankan pentingnya validasi multi-metode untuk material batuan terlapuk pada bendungan di Indonesia. Penelitian Arisanto et al. (2025) pada Proyek Bendungan Jragung juga menunjukkan batu lempung dengan durabilitas rendah dan resistivitas rendah cenderung berpotensi menimbulkan ketidakstabilan lereng.

Gap literatur signifikan meliputi: integrasi *back analysis* berbasis *multiple* literatur untuk material *limestone* terlapuk *residual soil heterogen*, validasi *GSI-Hoek Brown* pada zona terlapuk sedang, kuantifikasi deviasi *cross-method (LE manual vs FE numerik)*, analisis sensitivitas *controlling factor (c, ϕ , R_u)*, dan rekomendasi geometri optimal untuk bendungan di Indonesia dengan kondisi geologi serupa..

Penelitian ini bertujuan memvalidasi parameter geoteknik sandaran bendungan dengan material *limestone* terlapuk sempurna dan *residual soil* berlapis melalui *back analysis* terhadap longsoran aktual. Sejalan dengan penelitian Nassirzadeh et al. (2024) yang menyampaikan *back analysis* terhadap longsoran aktual merupakan metode efektif untuk mengidentifikasi parameter kuat geser pada kondisi data laboratorium terbatas, untuk analisis stabilitas dan desain ulang lereng pada kondisi geoteknik serupa. Dalam penelitian ini berfokus khusus pada: (1) karakterisasi geologi dan mekanisme longsoran berbasis enam titik bor dan interpretasi core log untuk mengidentifikasi zona kritis yang mengontrol stabilitas; (2) melakukan *back analysis* parametrized menggunakan 10 referensi material geologi serupa untuk mengidentifikasi parameter kuat geser (c , ϕ) yang menghasilkan $FS = 1.0$ saat failure; (3) memvalidasi parameter melalui *cross method* comparison antara *Limit Equilibrium (Fellenius manual)* dan *PLAXIS LE finite element method* untuk mengkuantifikasi deviasi dan kredibilitas parameter; (4) melakukan validasi *GSI-Hoek Brown* approach untuk material zona *weathered limestone Grade III*; dan (5) memberikan rekomendasi desain geometri optimal berdasarkan

parameter tervalidasi untuk memenuhi kriteria keamanan konstruksi (FS minimum 1,35-1.50). Penelitian ini diharapkan memberikan kerangka kerja *methodologically sound* untuk validasi parameter geoteknik pada kondisi geologi kompleks dengan data laboratorium terbatas, khususnya untuk bendungan di Indonesia dengan material *limestone* terlapuk dan *residual soil* berlapis heterogen.

METODE

Penelitian ini menggunakan metodologi *back analysis* untuk memvalidasi parameter geoteknik sandaran bendungan pada kondisi geologi kompleks dengan data laboratorium terbatas. Metodologi melibatkan integrasi investigasi lapangan, karakterisasi geologi, *back analysis* parameter dengan *multi-trial literature approach*, validasi *cross-method*, dan rekomendasi desain geometri optimal untuk menghasilkan parameter geoteknik yang dapat digunakan dalam analisis slope stability dan menentukan strategi perkuatan yang efektif.

Tahap 1: Investigasi Lapangan dan Karakterisasi Geologi

Investigasi lapangan dilaksanakan melalui enam titik pemboran inti (BGT-14, BGT-15, BGT-16, PH-1, PH-3, PH-4) pada area sandaran kiri Bendungan Bagong, dengan kedalaman berkisar 20-70 m dari permukaan. Setiap titik bor menghasilkan core log dengan dokumentasi visual litologi, tingkat pelapukan menurut klasifikasi Hearn. G.J. (2011), nilai *Rock Quality Designation (RQD)* menurut standar (Deere, 1989), dan karakteristik diskontinuitas.

Hasil observasi lapangan, longsoran diklasifikasikan sebagai rotational *non-circular* slide, seperti yang dijelaskan Craig, p. (2007), dengan bidang gelincir *non-circular* yang menembus kombinasi zona lemah (utamanya Zona 2: *residual soil*) sesuai material *layering* heterogen.

Tahap 2: Back analysis Parametrized dengan Multi-trial literature approach

Back analysis dilakukan dengan memodelkan geometri eksisting dan *slip surface non-circular* berdasarkan data lapangan. Faktor keamanan ditetapkan FS = 1.0 (kondisi kritis saat longsoran) untuk mengiterasikan parameter kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) hingga hasil analisis numerik menyerupai mekanisme kegagalan lapangan. Parameter referensi diadopsi dari 10 sumber literatur dengan kondisi material geologi serupa.

Pore pressure ratio (Ru) juga divariasikan untuk menggambarkan kondisi musiman: Ru=0,2 (baseline semi-drained musim normal), Ru=0.3 (musim hujan), Ru=0.4 (jenuh penuh). Hasil *back analysis* menggunakan *Software PLAXIS LE* dengan metode GLE (*Generalized Limit Equilibrium*) memberikan faktor keamanan untuk setiap *trial* dan setiap nilai Ru. Analisis numerik menggunakan PLAXIS LE terbukti efektif untuk mengevaluasi stabilitas lereng pada berbagai kondisi pembebanan, dengan tingkat akurasi yang dapat diandalkan untuk aplikasi praktis geoteknik (Fahriani, 2016)

Tahap 3: Validasi GSI-Hoek Brown Method untuk Zona Weathered limestone

Material Zona 3 (*weathered limestone Grade III, RQD=40-50%*) dianalisis menggunakan *GSI-Hoek Brown criterion* karena *RQD* $\geq 25\%$ menunjukkan *fractured rock mass behavior*, bukan *soil mechanics* murni Deere (1989). Konversi dari kriteria *Hoek-Brown non-linear* ke *Mohr-Coulomb linear* menggunakan persamaan *generalized Hoek-Brown criterion* Hoek & Brown (2019).

Tahap 4: Validasi Cross-method - Limit Equilibrium vs Finite Element

Untuk memvalidasi parameter *Trial 1* (Ru=0,2) dari *back analysis PLAXIS LE*, dilakukan perhitungan manual menggunakan metode *Fellenius* dengan 12 pias. Bidang gelincir dan pusat *slip surface* disamakan dengan analisis *PLAXIS LE* untuk konsistensi.

Tahap 5: Rekomendasi Desain Geometri Optimal

Berdasarkan parameter tervalidasi, dua skenario geometri alternatif dievaluasi menggunakan *PLAXIS LE* untuk mencapai faktor keamanan minimum FS $\geq 1,35$ untuk konstruksi, FS ≥ 1.50 untuk permanent slopes berdasarkan Terzaghi (2001) dan Canadian Geotechnical Society (2006)

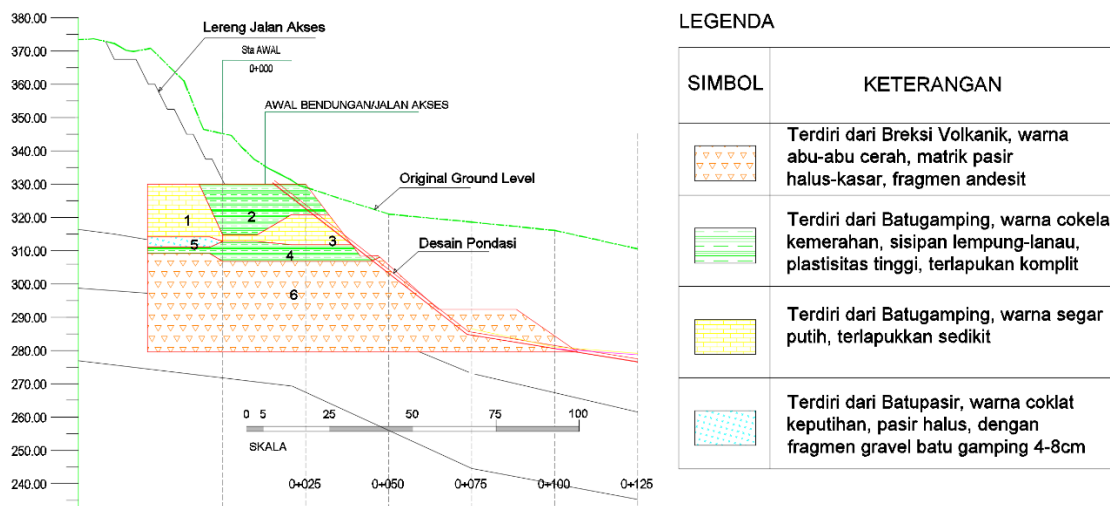
Sistem Analisis Numerik

Software yang digunakan adalah *PLAXIS LE (Limit Equilibrium)* dengan metode GLE (*Generalized Limit Equilibrium*) dan *Entry-Exit slip surface search*. Parameter input mencakup enam zona geoteknik dengan masing-masing parameter c, ϕ , γ sesuai hasil *back analysis*. Analisis stabilitas dilakukan untuk kondisi drained (Ru=0,2) dan kondisi ekstrem (Ru=0,25-0.30). Hasil output mencakup nilai FS dan lokasi bidang gelincir kritis.

HASIL

Kondisi Geologi

Berdasarkan Brantas River Basin Organization (BBWS Brantas) (2024) lokasi Bendungan Bagong terletak pada Formasi Mandalika yang didominasi oleh batuan vulkanik dengan komposisi utama breksi vulkanik sebagai dasar. Hasil pengeboran inti dari enam lokasi pada sandaran kiri (BGT-14, BGT-15, BGT-16, PH-1, PH-3, PH-4) menunjukkan *stratigrasi* kompleks yang dapat dikelompokkan menjadi enam zona geoteknik utama yang signifikan untuk analisis stabilitas *abutment*. Pengelompokan ini didasarkan pada jenis material dan derajat pelapukan menurut Hearn. G.J., (2011), yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Penampang geologi teknik sandaran kiri

Sumber: BBWS Brantas (2025)

Zona 1-2 (Transisi Batugamping Segar - Residual soil):

Ketebalan 5-15 m, batugamping terlapuk ringan (Grade I-II) berwarna putih kekuningan dengan matriks lempung-lanau, RQD 2-8%, bersifat transisional..

Zona 2 (Pure Residual soil - Layer Kritis):

Ketebalan 10-25 m menunjukkan material sangat lunak, material dikategorikan *Grade V-VI completely mass to residual soil* dengan $RQD = 0$, tidak lagi menunjukkan struktur batuan asli, berperilaku sepenuhnya sebagai *soil* dengan kuat geser sangat rendah. Zona 2 merupakan layer terlemah (critical zone) yang menjadi pengontrol utama faktor keamanan pada stabilitas sandaran kiri.

Zona 2-3 (Transisi Residual soil - Mass Rock):

Zona transisi antara *residual soil* murni (Zona 2) dan *mass rock* (Zona 3), dengan karakteristik campuran *residual soil* dan fragmen batugamping terlapuk. Ditemukan pada kedalaman 5-15 m dengan RQD berkisar 5-15%, menunjukkan mulai munculnya struktur batuan namun masih sangat tertutup oleh material *residual soil*.

Zona 5 (Batupasir/Sandstone):

Ketebalan 5-15 m pada kedalaman 20-35 m dari permukaan. Material berupa pasir coklat keputihan dengan gradasi halus-kasar, mengandung gravel batugamping 4-8 cm, dan menunjukkan fragmentasi batuan jelas pada core logging. Material bersifat keras dengan RQD berkisar 40-50% (*Rock Quality FAIR, Grade III-IV moderately mass rock*).

Zona 6 (Basement Breksi Vulkanik - Fresh Bedrock):

Kedalaman >35 m dari permukaan, terdiri dari breksi vulkanik. Observasi dari PH-4 (kedalaman 30-70 m), BGT-14 (30-45 m), BGT-16 (40-50 m), PH-3 (15-25 m) menunjukkan RQD sangat tinggi 70-100%. Material dikategorikan *Grade I-II Fresh to Slightly Mass* dengan *rock quality excellent*, merupakan lapisan pondasi yang stabil dan membentuk basement *rock* yang stabil dalam analisis.

Rock Quality Designation (RQD) per Zona

Analisis RQD dari enam titik pemboran mengidentifikasi variasi kualitas *massa* batuan yang signifikan dari permukaan hingga kedalaman. Hasil perhitungan RQD mengikuti standar Deere (1989) dari data core log menunjukkan zona-zona utama dengan karakteristik geomekanik berbeda.

Tabel 1. Nilai RQD masing-masing zona

Zona	Material Utama	Avg RQD (%)	Quality
1-2	Residual soil	4	Very Poor
2	Residual soil (Pure)	0	Very Poor
2-3	Residual + Mass	11	Very Poor
3	Weathered limestone	45	Fair
3-5	Residual + Mass	11	Very Poor
5	Sand/Batupasir	45	Fair
5-6	Sand + Bedrock	52	Fair
6	Breccia Bedrock Fresh	89	Excellent

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Pola *RQD* konsisten di seluruh enam titik pemboran, menunjukkan degradasi bertahap dari *basement rock segar* (*RQD* tinggi) menuju permukaan (*RQD* rendah), konsisten dengan mekanisme *weathering* alami pada profil slope. Klasifikasi nilai *RQD* menggunakan standar Deere (1989) mengidentifikasi tiga kategori material utama:

1. Zona Lemah Kritis (*RQD* <25%): Zona 1-2, Zona 2, dan Zona 2-3 dengan *RQD* masing-masing 4%, 0%, dan 11% diklasifikasikan sebagai *very poor quality*. Material pada zona ini tidak lagi menunjukkan struktur batuan segar, berperilaku sepenuhnya sebagai *soil* dengan kuat geser sangat rendah.
2. Zona Transisi (*RQD* 25-75%): Zona 3 (*Weathered limestone*), Zona 5 (*sand/batupasir*), dan Zona 5-6 (*sand-bedrock transition*) dengan *RQD* berkisar 40-60% merepresentasikan zona transisi dimana material mulai menunjukkan struktur batuan yang lebih terdefinisi, namun masih mengalami pelapukan. Pada zona ini, perilaku material dikontrol oleh *rock mass properties* dan tidak bisa diperlakukan sebagai *soil* murni, sehingga memerlukan pendekatan *rock properties* (*Hoek-Brown*) untuk menentukan parameter batuan.
3. Zona Stabil Foundation (*RQD* >75%): Zona 6 (*fresh bedrock*) dengan *RQD* rata-rata 89% menunjukkan kualitas *rock mass excellent* dengan struktur batuan segar dan pelapukan minimal. Zona ini berfungsi sebagai *foundation basement* yang stabil.

Identifikasi Longsoran

Investigasi lapangan terhadap kelongsoran dilakukan pada tanggal 14 Agustus 2025 pukul 02.00 WIB di area maindam Bendungan Bagong, Sta 0025-0075 DS (koordinat aproksimasi X = 576.657 km, Y = 9.116 km). Berdasarkan observasi bukti lapangan (retak mahkota, distribusi material longsor, pola keruntuhan) dan analisis geometri, mekanisme longsoran diklasifikasikan sebagai *rotational non-circular slide* sesuai kategori Craig, p. (2007, p. 348) untuk material berlapis yang tidak homogen.



Gambar 3. Tipe longsoran pada sandaran kiri

Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)



Gambar 4. Retak Mahkota dan Arah Longsoran

Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Bentuk tubuh longsoran yang teramati dari foto udara dan dokumentasi lapangan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4** yang menunjukkan karakteristik *rotational non-circular*. Longsoran menunjukkan 3 zona karakteristik: (1) *Crown*: retak mahkota melengkung tidak beraturan mundur ke hulu; (2) *Main Body*: perpecahan blok-blok material residual soil dan fragmen batugamping dengan pergerakan cepat (bukti audio gemuruh); (3) *Toe*: akumulasi material bertingkat di kaki lereng, mengindikasikan *progressive failure* pada material heterogen. Jarak mahkota-kaki 50-60 m horizontal.

Parameter Back analysis

Back analysis dilakukan dengan memodelkan geometri eksisting dan asumsi *slip surface non-circular* berdasarkan data lapangan dan dokumentasi longsoran aktual 14 Agustus 2025. Faktor keamanan (FS) ditetapkan sebesar 1.0 (kondisi kritis pada saat kegagalan) untuk mengiterasikan parameter kohesi (*c*) dan sudut geser dalam (φ) hingga diperoleh hasil analisis yang menyerupai mekanisme kegagalan yang teramati di lapangan seperti dijelaskan oleh C Wyllie & W Mah (1981).

Back analysis dilakukan melalui 10 *trial* iterasi dengan mengadopsi parameter referensi dari jurnal terdahulu yang memiliki kondisi geologi serupa, khususnya terhadap material *limestone mass Grade VI*, kemudian divariasikan untuk mencapai FS = 1.0. Jurnal yang digunakan dalam melakukan *back analysis* seperti pada

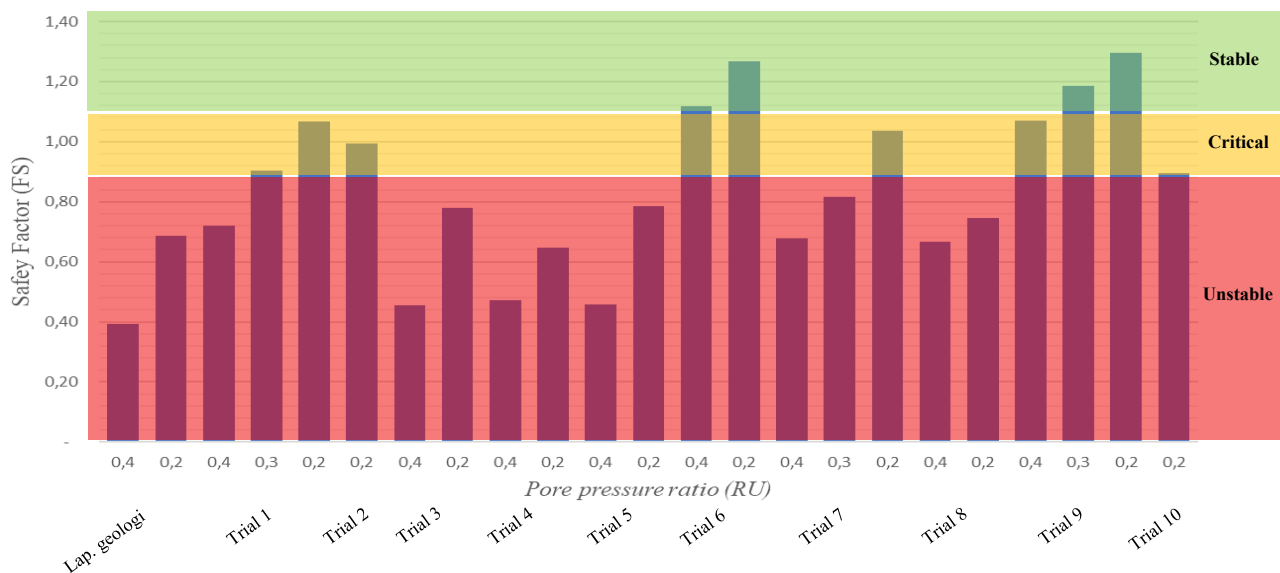
Tabel 2.

Tabel 2. Referensi Parameter Material

Trial	Jurnal/Sumber	Lokasi	Fokus Material	Parameter
1	Hilamawan (2024)		<i>Weathered limestone I</i>	$c = 35,5, \varphi = 23^\circ$
2	Hilamawan (2024)		<i>Weathered limestone II</i>	$c = 35,5, \varphi = 17^\circ$
3	Hilamawan (2024)	Bendungan Bagong, Trenggalek, Indonesia	Colluvial layer	$c = 11,67, \varphi = 22^\circ$
4	Hilamawan (2024)		All Mohr-Coulomb approach	Mixed parameters
5	Zolkepli et al. (2018)	Pahang Matriculation College, Malaysia	Tropical residual soil	$c = 9, \varphi = 25^\circ$
6	Bezie et al. (2024)	Limestone Quarry, Eastern Ethiopia	Limestone quarry Ethiopia	$c = 18.49, \varphi = 38^\circ$
7	Komadja et al. (2020)	Lesser Himalayan, India	Himalayan Grade V (extremely mass)	$c = 63.93, \varphi = 8.52^\circ$
8	Komadja et al. (2020)		Grade III-IV (less mass)	$c = 18.31, \varphi = 35^\circ$
9	Fatkhindari et al. (2020)	Bendungan Bagong, Trenggalek,	GSI-based Hoek-Brown (on-site Bagong)	Converted dari GSI
10	Suhartini et al. (2022)	Jalur Jalan Lintas Selatan, Yogyakarta	Residual soil, Wonosari-Punung Formation	$c = 0,22, \varphi = 43,92^\circ$

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Selain paramater material yang digunakan dalam proses *back analysis*, untuk mendapatkan kondisi yang menyerupai lapangan, nilai *Pore pressure ratio* (Ru) juga divariasikan. Dalam jurnal yang ditulis Johansson A & Edeskär (2014) mengutip dari J. M. Duncan & Wright (2005) mengungkapkan bahwa tekanan air eksternal bertindak menstabilkan lereng atau bendungan timbunan: “*This is perhaps the only good thing that water can do to a slope*”. Variasi musiman yang signifikan dapat mengubah faktor keamanan. Nilai *Pore pressure ratio* (Ru) yang berbeda setiap *trial* menghasilkan nilai *Safety factor* yang berbeda, seperti pada **Gambar 5**. Dari 10 hasil *trial* literatur berbeda dengan material yang serupa dipilih parameter *trial* 1 seperti pada **Tabel 3** dan hasil dari *Software PLAXIS LE* seperti pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**. Pemilihan parameter *Trial* 1 dari 10 literatur didasarkan pada empat kriteria utama, kredibilitas lokasi lokal, konsistensi nilai *safety factor*, kesamaan material dan konsistensi diantara referensi parameter lainnya.



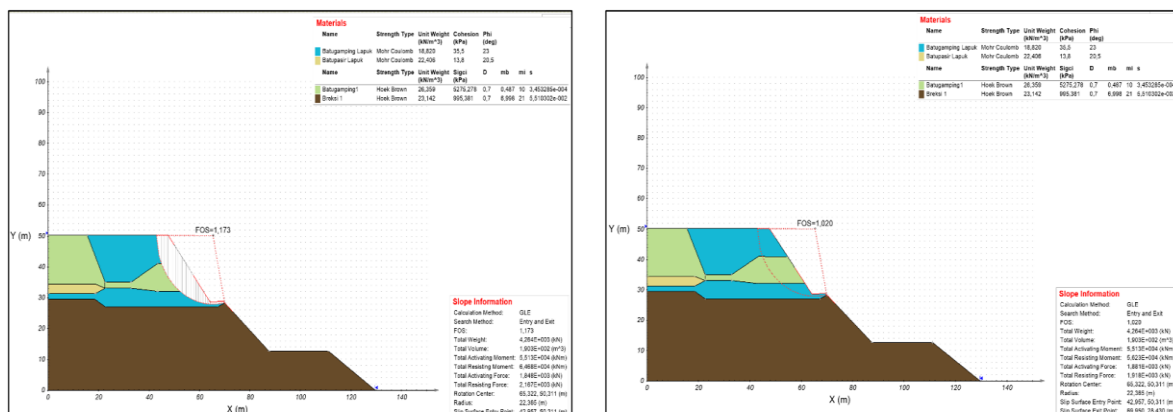
Gambar 5. Nilai *safety factor* masing-masing literatur

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Tabel 3. Parameter yang digunakan *trial back analysis*

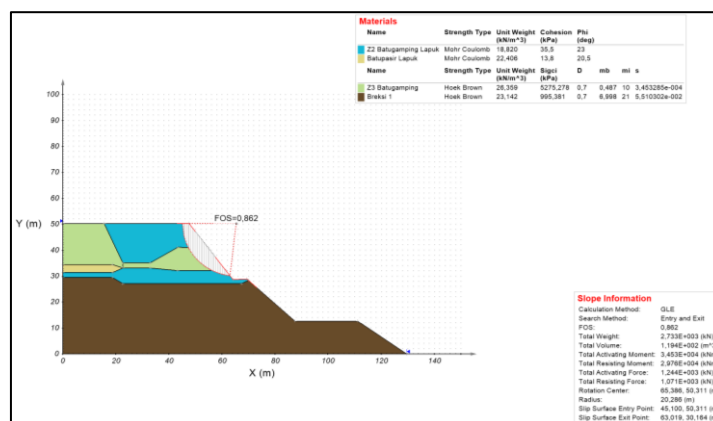
	Hilmawan G.B. (2024)			Lap. Pengujian Lab.			RU Coeff.	FS PLAXIS LE
	<i>Weathered limestone I</i>			<i>Rock UCS & Direct Shear (2025)</i>				
	C (kPa)	ϕ'	ρ sat (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ'	ρ sat (kN/m ³)		
Batugamping Lapuk	35,5	23	18,82				0,4	0,862
Batupasir Lapuk	13,8	20,5				22,406	0,3	1,02
Batugamping				240,35	42	26,359	0,2	1,173
Batupasir				208,81	33	22,406		
Breksi				224,42	36	23,142		

Sumber: Analisis Penulis (2025)



Gambar 6. Hasil *PLAXIS LE* Menggunakan Parameter *Trial 1* (RU: 0,2 dan 0,3)

Sumber: Analisis Penulis (2025)



Gambar 7. Hasil *PLAXIS LE* Menggunakan Parameter *Trial 1* (RU: 0,4)

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Parameter Mohr-Coulomb dari Konversi Hoek-Brown (Zona 3)

Berdasarkan nilai GSI yang telah diestimasi untuk setiap zona, parameter *Hoek-Brown* (mb, s, a) dihitung menggunakan persamaan *Hoek-Brown criterion* dari C Wyllie & W Mah, p. (1981, p. 95). Hasil perhitunganan persamaan *Hoek-Brown* seperti pada

Tabel 4.

Tabel 4. Nilai parameter *Hoek-Brown* untuk material batuan

	GSI	D	mb	mi	s	a
<i>Weathered limestone (Grade III)</i>	45	0,7	0,37	10	0,00035	0,659
<i>Sandrock/Batupasir</i>	30	0,7	0,4059	19	0,00004	0,659

	GSI	D	mb	mi	s	a
Breccia Bedrock Fresh	80	0,7	6,998	21	0,05510	0,659

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Material Zona 3 (*Weathered limestone, Grade III-IV, RQD 40-50*) menunjukkan karakteristik moderately *mass rock* yang tidak sesuai dengan *soil mechanics* murni (*Mohr-Coulomb* klasik). Oleh karena itu, dilakukan konversi dari kriteria *Hoek-Brown non-linear* ke *Mohr-Coulomb* linear untuk dapat digunakan dalam perhitungan manual metode *Limit Equilibrium (Fellenius)*. Hasil perhitungan *Mohr-Coulomb Criteration* seperti pada

Tabel 5.

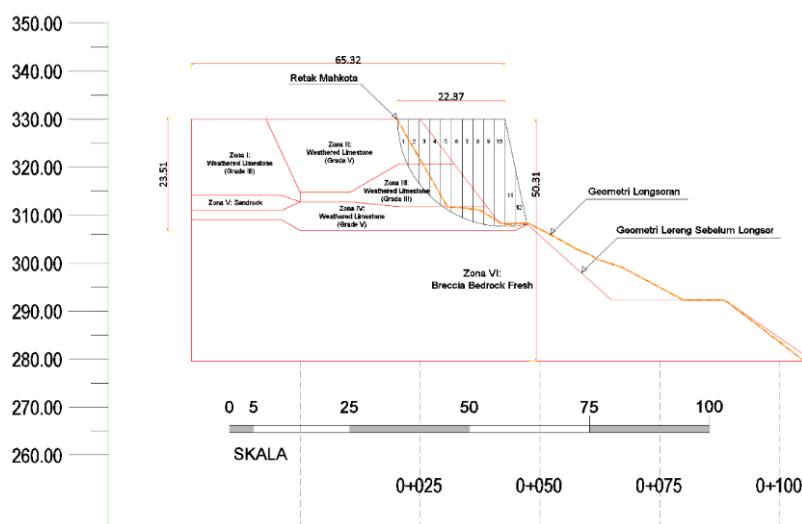
Tabel 5. Perhitungan Mohr-Coulomb Criteration
Weathered limestone (Grade III)

Generalized Hoek-Brown Criteration						Lap. Pengujian Lab. Rock UCS & Direct Shear (2025)			
GSI	D	a	mb	mi	s	σ_{ci}	H	γ_r	
						Mpa	m	kN/m ³	MN/m ³
45	0,7	0,659	0,487	10	0,00035	52,7348	23	26,3595	0,02636
<i>Mohr-Coulomb Criteration</i>						$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$ $c = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \times \sqrt{\frac{1 + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$			
	σ'_{cm}	1,024	Mpa						
	σ_0	0,606	Mpa	ϕ'	35,513°				
	σ'_{3max}	0,458	Mpa	c'	92,435 kPa				
	σ'_{3n}	0,009	Mpa						

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Analisis Stabilitas *Limit Equilibrium* - Metode *Fellenius*

Untuk memvalidasi hasil *back analysis* numerik dari *PLAXIS LE*, dilakukan perhitungan manual menggunakan Metode *Fellenius (Ordinary method of slices)* dengan parameter identik dari *Trial 1 (Ru = 0,2)*. Berdasarkan analisis kondisi eksisting, permukaan gelincir potensial pada sandaran kiri berbentuk *non-circular slip surface* dengan bidang gelincir utama terletak pada batas antara Zona 2 (*Residual soil*) dan Zona 3 (*Weathered limestone*). Penentuan titik pusat bidang longsor disamakan dengan titik pusat pada bidang longsor dari *Software PLAXIS LE* untuk memastikan perbandingan yang konsisten antara perhitungan manual dan numerik. *Massa* lereng dibagi menjadi $n = 12$ pias dengan lebar masing-masing pias 2,24 meter mengikuti kondisi geometri lereng, seperti pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Pembagian Pias Pada Bidang Longsor

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Berdasarkan perhitungan pada

Tabel 6, faktor keamanan lereng menggunakan metode *Fellenius* dengan 12 pias, dihitung menggunakan persamaan (1) didapatkan faktor keamanan 1,2588 pada bidang gelincir yang ditentukan berdasarkan geometri longsor aktual dari hasil observasi lapangan dan koordinat pusat *slip surface* yang disamakan dengan analisis *PLAXIS LE*. Perhitungan metode *Fellenius* secara manual seperti pada

Tabel 6 memperhitungkan detail untuk setiap pias, yaitu: sudut kemiringan bidang gelincir (α), panjang bidang gelincir pada setiap pias (L), tinggi pias (h), luas area pias, parameter kuat geser (c' dan ϕ) sesuai zona material yang dilewati, berat irisan (W), komponen gaya geser ($W \cdot \sin \alpha$) dan normal ($W \cdot \cos \alpha$), tekanan air pori ($u \cdot L$), serta kontribusi gaya penahan dari kohesi dan gesekan [$(W \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \phi$]. Penjumlahan seluruh komponen dari 12 pias menghasilkan nilai faktor keamanan total melalui Persamaan (1).

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^p c' \Delta L_n + \sum_{n=1}^p (W_n \cos \alpha_n - u_n \Delta L_n) \tan \phi'}{\sum_{n=1}^p W_n \sin \alpha_n} \quad (1)$$

$$= \frac{1,173 - 1,2588}{1,173} \times 100\% = 7,32\% \quad (2)$$

Untuk memvalidasi hasil perhitungan manual dengan analisis numerik yang menggunakan *Software PLAXIS LE*, perhitungan dengan metode *Fellenius* dilakukan dengan parameter yang identik. Hasil analisis numerik menggunakan parameter *trial 1* dengan nilai RU = 0,2 didapatkan nilai faktor keamanan 1,173. Perbandingan antara kedua metode menunjukkan deviasi sebesar 7,32%, dengan perhitungan pada persamaan (2). Kedua metode mengklasifikasikan lereng dalam kondisi KRITIS (FS < 1,4), sehingga dibutuhkan perbaikan geometri sandaran kiri Bendungan Bagong, pada saat pelaksanaan konstruksi.

Tabel 6. Perhitungan Metode *Fellenius*

Slice	Zone	α °	L m	C' kPa	γ kN.m3	W kN	$W \cdot \sin \alpha$	$W \cdot \cos \alpha$	$u \cdot L$	ϕ °	$(W \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \phi$
1	2	79,64	10,09	35,5	18,82	275,26	272,49	49,81	292,44	23	-144,30
	3			92,43	26,359	1,75			35,813	-245,30	
	4			0	0	0,00			23,00		
2	2	72,65	4,31	35,5	18,82	388,60	510,92	159,62	191,92	23,00	-26,64
	3			92,43	26,359	146,67			35,81	-45,28	
	4			0	0	0,00			23,00		
3	2	64,33	3,40	35,5	18,82	336,96	596,77	286,82	174,18	23,00	43,02
	3			92,43	26,359	325,15			35,81	73,13	
	4			0	0	0,00			23,00		
4	2	54,04	2,95	35,5	18,82	214,98	542,03	393,23	142,02	23,00	103,95
	3			92,43	26,359	454,67			35,81	176,71	
	4			0	0	0,00			23,00		
5	2	43,52	2,68	35,5	18,82	92,62	439,03	462,32	116,01	23,00	141,23
	3			92,43	26,359	524,46			35,81	240,07	
	4			35,5	18,82	20,49			23,00	141,23	
6	2	33,96	2,51	35,5	18,82	4,04	310,45	460,95	93,44	23,00	151,10
	3			92,43	26,359	477,87			35,81	256,85	
	4			35,5	18,82	73,84			23,00	151,10	
7	2	24,57	2,39	0	0	0,00				23,00	
	3			92,43	26,359	311,12	177,21	387,60	100,42	35,81	237,48
	4			35,5	18,82	115,07			23,00	139,70	
8	2	16,28	2,31	0	0	0,00				23,00	
	3			92,43	26,359	138,71	79,47	272,11	69,42	35,81	186,43
	4			35,5	18,82	144,77			23,00	109,67	
9	2	9,16	2,26	0	0	0,00				23,00	
	3			92,43	26,359	7,99	22,64	140,44	38,25	35,81	112,05
	4			35,5	18,82	134,25			23,00	65,92	
10	2	3,03	2,24	0	0	0,00				23,00	
	3			0	0	0,00			35,81		
	4			35,5	18,82	43,26	2,29	43,20	9,53	23,00	14,29
11	2	-2,94	2,24	0	0	0,00				23,00	
	3			0	0	0,00			35,81		
	4			35,5	18,82	32,15	-1,65	32,11	6,49	23,00	10,87
12	2	-8,56	2,42	0	0	0,00				23,00	
	3			0	0	0,00			35,81		
	4			35,5	18,82	25,59	-3,81	25,31	6,01	23,00	8,19
Σ						4290,271	2947,842	2713,518	1240,102		1901,465

Sumber: Analisis Penulis (2025)

Pembahasan

Validasi Parameter *Trial 1*

Pemilihan parameter *Trial 1* dari penelitian Bobby Hilmawan et al. (2024) didasarkan pada empat kriteria. Pertama, kredibilitas lokal: parameter bersumber dari penelitian pada *abutment* kanan Bendungan Bagong yang identik

secara geologi, berjarak kurang dari 500 m dari lokasi studi, sehingga representatif untuk kondisi lapangan. Kedua, konsistensi faktor keamanan: parameter *Trial 1* dengan nilai $R_u = 0,2$ menghasilkan $FS_{PLAXIS LE} = 1,173$. Validasi hitungan *PLAXIS LE* digunakan perhitungan manual dengan metode *Fellenius*, didapatkan hasil nilai $FS = 1,2588$ (deviasi 7,32%), menunjukkan validitas parameter untuk berbagai metode analisis (Duncan, 1996). Ketiga, kesamaan material: *limestone mass Grade V-VI* pada penelitian Hilmawan identik dengan material zona kritis pada sandaran kiri yang bersifat *soil*, didasarkan pada jenis material dan derajat pelapukan menurut Hearn. G.J. (2011). Keempat, perbandingan 9 *trial* alternatif menunjukkan hanya *Trial 1* dengan nilai $c = 35,5$ kPa dan $\phi = 23^\circ$ yang konsisten dengan kondisi kritis longsoran aktual, sedangkan *trial* lain menghasilkan FS tidak konsisten atau parameter material tidak sesuai.

Validasi GSI-Hoek Brown Method

Material Zona 3 (*Weathered limestone Grade III*, $R_{QD} = 40-50\%$) memerlukan pendekatan *rock strength properties* (*GSI-Hoek Brown*), bukan *soil mechanics* murni, karena $R_{QD} \geq 25\%$ menunjukkan *fractured rock mass behavior* (Deere, 1989). Parameter input untuk kriteria *Hoek-Brown* seperti pada

Tabel 4, menghasilkan konversi *Mohr-Coulomb* $c = 92,43$ kPa, $\phi = 35,81^\circ$. Nilai kohesi mencerminkan kekuatan batuan utuh dan roughness diskontinuitas; perbandingan dengan Zona 2 ($c = 35,5$ kPa) menunjukkan $\Delta c = 56,93$ kPa, mengkonfirmasi perbedaan kuat geser signifikan. Sudut geser $\phi = 35,81^\circ$ konsisten dengan friction *limestone Grade III*, seperti disampaikan Wyllie & Mah (1981) dengan material serupa, nilai $\phi = 30-40^\circ$.

Parameter c dan ϕ dari *GSI-Hoek Brown* konsisten dengan *back analysis result Trial 1*, mengkonfirmasi kombinasi parameter merepresentasikan heterogenitas geologi akurat: kedua set parameter menghasilkan $FS_{PLAXIS LE} = 1,173$ dan $FS_{Fellenius method} = 1,2588$ dengan bidang gelincir pada interface Zona 2-Zona 3 sesuai observasi lapangan. Pendekatan *GSI-Hoek Brown* untuk material *weathered rock* telah diterapkan pada kondisi geologi Jawa Timur oleh Hery Mulyanto (2022), di mana konversi ke kriteria *Mohr-Coulomb* menghasilkan perbedaan faktor keamanan 16-50%, menunjukkan pentingnya pemilihan kriteria keruntuhan yang tepat untuk analisis stabilitas lereng pada batuan terlapuk dengan tingkat pelapukan sedang hingga tinggi, karena kriteria *Mohr-Coulomb* cenderung menghasilkan over-estimasi pada kondisi tegangan rendah.

Validasi Cross method - Deviasi 7,32%

Deviasi 7,32% antara $FS_{Fellenius Manual} (1,2588)$ dan $FS_{PLAXIS LE} (1,173)$ dapat diterima dalam konteks kondisi *semi-drained*. Analisis yang dilakukan Khabbaz et al. (2012), deviasi antara *Limit Equilibrium method* (*SLOPE/W* dengan *Morgenstern-Price*) dan *finite element method* (*PLAXIS LE* dengan *Phi-c reduction*) berkisar 1,1%-17,8% tergantung kondisi *drainage*. Pada penelitian ini, $R_u = 0,2$ (tekanan air pori 20% tegangan overburden) merepresentasikan *semi-drained*, sehingga deviasi 7,32% berada dalam range yang diharapkan (5-10%), mengkonfirmasi hasil *back analysis* masih dapat diterima.

Duncan (1996) menyatakan "*The ordinary method of slices (OMS = Fellenius) is highly inaccurate for effective stress analyses of flat slopes with high pore pressure*". Kondisi sandaran kiri dengan slope 35 sampai dengan 40° , dan nilai $R_u = 0,2$ memenuhi kriteria ini, sehingga $FS_{Fellenius} = 1,2588$ overestimate dibanding $FS_{PLAXIS LE} = 1,173$, konsisten prediksi Duncan. Deviasi 7,32% bukan error, melainkan konsekuensi limitasi inherent metode *Fellenius* pada kondisi ini. Hasil deviasi 7,32% dalam penelitian ini konsisten dengan studi Indrawan et al. (2024) pada Bendungan Leuwikeris yang menemukan deviasi kurang dari 14% antara metode *LE* dan *FE* pada kondisi statik untuk material batuan terlapuk, mengkonfirmasi bahwa deviasi di bawah 15% masih dapat diterima untuk validasi *cross-method* pada kondisi geologi kompleks di Indonesia.

Menurut persyaratan nilai keamanan oleh Terzaghi (2001) dan Canadian Geotechnical Society (2006) kondisi sandaran kiri kritis ($FS < 1,4$, tidak memenuhi $FS \geq 1,35$, memerlukan perbaikan geometri atau perkuatan. Konvergensi kesimpulan ini mengkonfirmasi kredibilitas parameter: (1) independensi metode - dua metode fundamentally berbeda mencapai kesimpulan sama, menunjukkan parameter bukan overfitting; (2) robustness parameter - valid untuk berbagai metode, merepresentasikan kondisi aktual material; (3) akurasi prediksi - $FS = 1,0-1,2$ (kritis marginal) sesuai observasi longsoran setelah hujan intensif, mengkonfirmasi kombinasi parameter (c , ϕ , R_u) akurat memprediksi mekanisme failure.

Rekomendasi Geometri Lereng Optimal

Kondisi eksisting lereng sandaran kiri menunjukkan kemiringan rata-rata berkisar $38-40^\circ$ dengan ketinggian sekitar 50 m. Analisis stabilitas untuk kondisi *Pore pressure ratio* $R_u = 0,2$ menghasilkan faktor keamanan $FS = 1,173$, yang termasuk dalam kategori kritis dan tidak memenuhi kriteria faktor keamanan minimum yang berlaku untuk struktur penting seperti bendungan. Penggabungan antara geometri yang tidak ideal, material *residual soil* dengan kuat geser terbatas ($c = 35,5$ kPa, $\phi = 23^\circ$), dan tekanan air pori signifikan menciptakan keadaan yang tidak aman untuk operasi

- Canadian Geotechnical Society. (2006). *Canadian Foundation Engineering Manual 4th Edition*.
- Craig, R. F. (2007). *Craig's Soil Mechanics, Seventh edition*. Spon Pers
- Deere, D. U. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years*. In *Rock classification system for engineering purpose* (ASTM STP 984, pp.91-101). ASTM International.
- Duncan, J. M. (1996). *STATE OF THE ART: Limit Equilibrium And Finite-Element Analysis Of Slopes*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577-596. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
- Fahriani, F. (2016). Analisis Pengaruh Ketinggian Timbunan Terhadap Kestabilan Lereng. In *Jurnal Fropil*. 4(1), 39-48. <http://doi.org/10.33019/fropil.v4i1.1238>
- Hearn, G.J. (2011). *Slope Engineering for Mountain Roads*. The Geological Society. www.geolsoc.org.uk.
- Hery Mulyanto. (2022). Analisis Kestabilan Lereng Pada Batuan Lapuk Menggunakan Kriteria Keruntuhan Generalized Hoek-Brown Dan Mohr-Coulomb Ekuivalen (Slope Stability Analysis Of Weathered Rock Applying Generalized Hoek-Brown And Equivalent Mohr-Coulomb Failure Criterion). In *Jurnal Jalan-Jembatan* (Vol. 39, Issue 1). Retrieved from <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/1069>
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445–463. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>
- Indrawan, I. G. B., Sunardi, Murti, A. B., & Alfrianto, R. (2024). Comparison of stability analysis methods for safe design of volcanic rock slope. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 12(1), 6651–6664. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.121.6651>
- Johansson A, J. M., & Edeskär, T. (2014). *Effects of External Water-Level Fluctuations on Slope Stability*. In *Proceedings of the 8th European Conference on Numerical Method in Geotechnical Engineering*
- Khabbaz, H., Fatahi, B., & Nucifora, C. (2012). *Finite Element Methods against Limit Equilibrium Approaches for Slope Stability Analysis*. *Australian Geomechanics Journal*, 47(4), 85-89. <http://hdl.handle.net/10453/19297>
- Nassirzadeh, R., Dini, A., & Balagar, V. (2024). Back analysis of cohesion and friction angle of failed slopes using probabilistic approach: two case studies. *International Journal of Geo-Engineering*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-024-00205-5>
- Satya, M., Danuartha, H., & Widiyanto, H. (2022). *Analisis Kekuatan Massa Batuan dan Stabilitas Lereng Intake Bendungan Bener Berdasarkan Metode Empiris, Analitis, dan Numerik* (Vol. 5, Issue 1), 16-25. <https://doi.org/10.14710/jgt.5.1.2022.16-25>
- Terzaghi, K. (2001). *Theoretical Soil Mechanics (Copyright 1943 John Wiley & Sons)*.