

ANALISIS STABILITAS LERENG MENGGUNAKAN *BAMBOO CRIB WALL*

Angelina Christi Agung Nirmala^{1*} dan Aniek Prihatiningsih¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
*angelina.christi12@gmail.com

Masuk: 02-12-2025, revisi: 18-12-2025, diterima untuk diterbitkan: 05-01-2026

ABSTRACT

Slope stability is a critical aspect of geotechnical engineering, particularly on steep terrains prone to landslides. This study analyzes the effectiveness of Bamboo Crib Walls as an eco-friendly and economical reinforcement alternative by comparing single-trap and multi-trap (terraced) designs. Stability analysis was conducted using the Limit Equilibrium Method on a 14-meter high slope with a 60° inclination in Tambakmerang Village, Wonogiri. Simulation results showed the existing slope has a Safety Factor (SF) of 1.366. While categorized as relatively stable, it fails to meet the SNI 8460:2017 standard for permanent slopes with high uncertainty, which requires an SF ≥ 2.0 . The single-trap design (H = 4 m, B = 3 m) increased the SF to 1.571, yet remained below the minimum national requirement. In contrast, the terraced design (2-trap) with identical dimensions achieved optimal stability with an SF of 2.823, significantly exceeding the safety standard. This study concludes that the terraced Bamboo Crib Wall is the most effective solution, as the terracing system provides superior load distribution and retention compared to the single-trap model in resisting driving forces on steep slopes.

Keywords: Bamboo crib wall; safety factor; bishop method; slope stability

ABSTRAK

Stabilitas lereng merupakan aspek krusial dalam rekayasa geoteknik, terutama pada topografi curam yang rentan terhadap kelongsoran. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas *Bamboo Crib Wall* sebagai alternatif perkuatan ramah lingkungan dan ekonomis dengan membandingkan desain tunggal (*single-trap*) dan bertingkat (*multi-trap*). Analisis stabilitas dilakukan menggunakan Metode Keseimbangan Batas pada lereng setinggi 14 meter dengan sudut kemiringan 60° di Desa Tambakmerang, Wonogiri. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lereng eksisting memiliki Faktor Keamanan (FK) sebesar 1,366. Kondisi ini dikategorikan relatif stabil namun belum memenuhi standar SNI 8460:2017 untuk lereng permanen dengan tingkat ketidakpastian tinggi yang mensyaratkan $FK \geq 2,0$. Penerapan *Bamboo Crib Wall* desain *single-trap* (H = 4 m, B = 3 m) meningkatkan FK menjadi 1,571, tetapi masih di bawah persyaratan minimum standar nasional. Sementara itu, variasi desain bertingkat (*2-trap*) menghasilkan stabilitas paling optimal dengan nilai FK sebesar 2,823, yang telah jauh melampaui batas aman minimum. Penelitian ini menyimpulkan bahwa modifikasi *Bamboo Crib Wall* model bertingkat adalah solusi paling efektif karena sistem terasering memberikan distribusi beban dan retensi yang lebih baik dibandingkan model tunggal dalam menahan gaya penggerak pada lereng curam.

Kata kunci: *Bamboo crib wall*; faktor keamanan; metode bishop; stabilitas lereng

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki karakteristik topografi yang sangat beragam dengan variasi elevasi yang signifikan antarwilayah, kondisi yang secara alami membentuk banyak lereng curam. Secara definisi, lereng merupakan permukaan tanah yang membentuk sudut inklinasi tertentu terhadap bidang horizontal, di mana massa tanah selalu berada di bawah pengaruh gaya gravitasi yang menciptakan kecenderungan pergerakan material dari elevasi tinggi ke rendah. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng menjadi tantangan geoteknik yang krusial dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi guna memitigasi risiko kegagalan struktur (Surendro, 2015). Pengelolaan stabilitas ini sangat vital untuk mencegah potensi bencana geoteknik pada proyek infrastruktur (Das, 2010).

Di sisi lain, keterbatasan lahan produktif memaksa ekspansi pembangunan infrastruktur merambah ke area dengan kondisi tanah marginal, termasuk tanah lunak atau gambut. Tanah dengan konsistensi lunak ini menghadirkan tantangan teknis tersendiri. Kendala utama yang timbul saat mendirikan bangunan di atas lapisan tanah lunak adalah rendahnya kapasitas daya dukung (*bearing capacity*) dan tingginya potensi penurunan (*settlement*) yang dapat membahayakan struktur (Bowles, 1989).

Stabilitas lereng

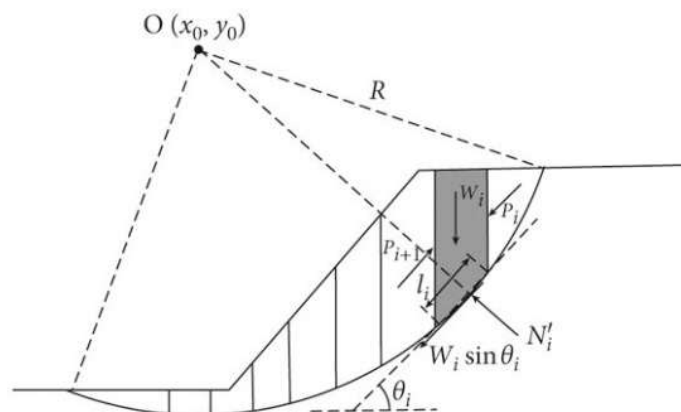
Secara definisi, stabilitas lereng merupakan kondisi kesetimbangan di mana massa tanah pada suatu lereng mampu mempertahankan posisinya tanpa mengalami keruntuhan atau pergerakan masif akibat gaya-gaya yang bekerja. Tingkat kestabilan ini dipengaruhi oleh interaksi berbagai parameter kompleks, meliputi geometri kemiringan lereng, karakteristik geomekanik material penyusun, kondisi hidrologi (kadar air), beban eksternal (*surchage*) akibat aktivitas manusia, serta keberadaan vegetasi sebagai elemen pengikat alami (Das, 2010).

Dalam evaluasi geoteknik, parameter kuantitatif yang digunakan untuk menentukan tingkat keamanan adalah Faktor Keamanan (FK). Nilai ini merepresentasikan rasio perbandingan antara gaya penahan (*resisting force*) yang dimiliki tanah terhadap gaya penggerak (*driving force*) yang memicu kelongsoran. Secara teoritis, suatu lereng dinyatakan dalam kondisi stabil apabila nilai $FK > 1$, sedangkan kondisi $FK < 1$ mengindikasikan bahwa lereng tersebut berada dalam kondisi kritis dan berisiko tinggi mengalami keruntuhan. Oleh karena itu, analisis dan pengelolaan stabilitas lereng menjadi aspek fundamental dalam perencanaan konstruksi guna memitigasi risiko bencana geoteknik dan menjamin keberlanjutan infrastruktur (Das, 2010).

Metode fellenius

Metode Fellenius, atau dikenal juga sebagai *Ordinary Method of Slices*, merupakan pendekatan analisis stabilitas lereng yang mengevaluasi Faktor Keamanan (FK) berdasarkan prinsip kesetimbangan momen pada suatu bidang gelincir yang diasumsikan berbentuk busur lingkaran (*circular slip surface*). Secara mendasar, metode ini mengkalkulasi rasio antara total momen gaya penahan (*resisting moment*)—yang bersumber dari parameter kohesi tanah dan tahanan gesek—terhadap total momen gaya penggerak (*driving moment*) yang diakibatkan oleh berat massa tanah serta beban eksternal yang bekerja pada lereng tersebut (Huang, 2014).

Ilustrasi mengenai mekanisme gaya yang bekerja pada irisan tanah dalam metode Fellenius disajikan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Metode Fellenius (Huang, 2014)

Berikut merupakan rumus perhitungan metode Fellenius yang tersaji pada perhitungan 1.

$$FK = \frac{\sum(c' \cdot l + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \cdot \tan \varphi')}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

Dengan W = berat potongan atau irisan, L = panjang bidang failure, θ = sudut kemiringan, N = gaya normal yang bekerja pada irisan, b = lengan momen, O = titik pusat rotasi, R = jari-jari bidang gelincir

Faktor keamanan

Evaluasi stabilitas lereng sangat bergantung pada penentuan nilai Faktor Keamanan (FK) sebagai indikator utama kestabilan. Di Indonesia, standar acuan untuk menentukan batas aman suatu desain lereng diatur dalam SNI 8460:2017. Standar ini menetapkan nilai FK minimum berdasarkan jenis material pembentuk lereng (batuan atau tanah) serta masa layanan konstruksi tersebut. Selain standar nasional, referensi empiris dari Bowles (1989) juga sering digunakan untuk mengkorelasikan nilai FK dengan probabilitas atau intensitas kejadian longsor yang pernah terjadi di lapangan.

Rincian mengenai standar nilai keamanan untuk lereng tanah yang mempertimbangkan aspek risiko dan ketidakpastian data disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai faktor keamanan untuk lereng tanah (Badan Standarisasi Nasional, 2017)

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah*	Tinggi**
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	≥ 2,0

*Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan rendah, jika kondisi geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.

**Tingkat ketidakpastian kondisi analisis dikategorikan tinggi, jika geologi dapat dipahami, kondisi tanah seragam, penyelidikan tanah konsisten, lengkap dan logis terhadap kondisi di lapangan.

Sebagai pembandingan, klasifikasi stabilitas berdasarkan intensitas kejadian longsor menurut Bowles (1989) dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hubungan faktor keamanan lereng dengan intensitas longsor (Bowles, 1989)

Kondisi lereng batuan	Kejadian/intensitas longsor	
$F < 1,07$	Longsor terjadi biasa/sering	Lereng tidak stabil
$1,0 < F < 1,25$	Longsor pernah terjadi	Lereng kritis
$F > 1,25$	Longsor jarang terjadi	Lereng relatif stabil

Dinding penahan tanah

Dinding penahan tanah, atau dikenal sebagai *retaining wall*, merupakan elemen struktural geoteknik yang dirancang untuk memberikan stabilitas lateral pada massa tanah ketika terdapat perbedaan elevasi yang melebihi sudut geser alaminya. Menurut Bowles (1989), fungsi fundamental dari struktur ini adalah mencegah terjadinya kegagalan lereng atau longsor yang diakibatkan oleh kombinasi beban gravitasi, tekanan hidrostatis air, serta beban eksternal (*surchage*) yang bekerja pada permukaan tanah.

Dalam klasifikasi rekayasa sipil, dinding penahan tanah umumnya dibedakan menjadi dua kategori utama berdasarkan tingkat kekakuan strukturnya, yaitu dinding kaku (*rigid*) dan dinding fleksibel. Dinding penahan tipe kaku, seperti dinding gravitasi (*gravity wall*) dan dinding kantilever, biasanya dikonstruksi menggunakan material beton bertulang atau pasangan batu. Stabilitas dinding jenis ini sangat bergantung pada berat sendiri struktur atau momen jepit pada dasar dinding untuk mengimbangi tekanan tanah aktif yang bekerja (Al-Shukur & Al-Rammah, 2017).

Sebagai alternatif yang lebih adaptif, dinding penahan tipe fleksibel seperti *crib wall* menawarkan keunggulan dalam mengakomodasi penurunan tanah (*settlement*) tanpa mengalami kerusakan struktural yang signifikan, berbeda dengan dinding beton yang cenderung kaku. Salah satu inovasi dalam kategori ini adalah *Bamboo Crib Wall*, yang merupakan modifikasi dari dinding gravitasi fleksibel. Struktur ini tersusun atas rangkaian sel bambu yang saling mengunci (*interlocking*) dan diisi dengan material tanah atau batuan padat. Dalam sistem ini, stabilitas utama diperoleh dari massa material pengisi, sementara anyaman bambu berfungsi sebagai kerangka penahan atau *formwork* (Acharya, 2018). Selain itu, pemanfaatan material bambu dalam metode *soil bio-engineering* ini juga berperan penting sebagai elemen struktural yang efektif dalam menahan tekanan tanah (Tardio et al., 2018).

Crib wall

Metode *Crib Wall* merupakan salah satu pendekatan teknis dalam rekayasa bio-teknik tanah (*soil bio-engineering*) yang mengintegrasikan kerangka struktural dari material organik, seperti kayu atau bambu, dengan material pengisi berupa tanah dan vegetasi. Struktur ini dikonstruksi dengan menyusun batang bambu atau kayu secara berlapis (*interlocking*) untuk membentuk dinding penahan yang mampu menstabilkan lereng, di mana stabilitas utamanya diperoleh dari berat material pengisi dan kekuatan kerangka penahan (Acharya, 2018).

Mekanisme kerja *crib wall* mengandalkan prinsip struktur berongga; lapisan bambu yang disusun horizontal berfungsi sebagai elemen penahan tanah (*retaining element*), sementara rongga antar-bambu menyediakan media bagi perakaran tanaman untuk berkembang. Seiring waktu, akar tanaman yang menembus tanah akan mengikat material pengisi dan kerangka bambu menjadi satu kesatuan komposit yang solid, yang secara signifikan meningkatkan stabilitas lereng (Acharya, 2018).

Dalam konteks *soil bio-engineering*, material vegetatif tidak sekadar berfungsi sebagai penutup lahan. Lebih dari itu, batang bambu dan tanaman hidup dimanfaatkan secara aktif sebagai elemen struktural utama yang bertugas menahan beban gravitasi serta tekanan tanah lateral (Tardio et al., 2018). Penerapan metode ini sering kali memanfaatkan potensi sumber daya lokal, seperti kombinasi bambu dengan tanaman Kaliandra. Pemanfaatannya secara spesifik bersama tanaman Kaliandra sebagai material perkuatan lereng terbukti efektif dalam upaya mitigasi longsor (Zayadi et al., 2023).

Penggunaan bambu sebagai perkuatan lereng

Bambu merupakan material alami yang memiliki potensi besar dalam aplikasi rekayasa teknik karena karakteristik mekanisnya yang unggul (Ardhyanta et al., 2012). Dalam perkembangan teknologi material komposit, tren saat ini mulai bergeser dari ketergantungan pada bahan sintesis menuju pemanfaatan material berbasis alam. Secara spesifik, matriks serat bambu diketahui mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan ketangguhan (*toughness*) dan kekakuan (*stiffness*) ketika diaplikasikan sebagai penguat pada komposit polimer.

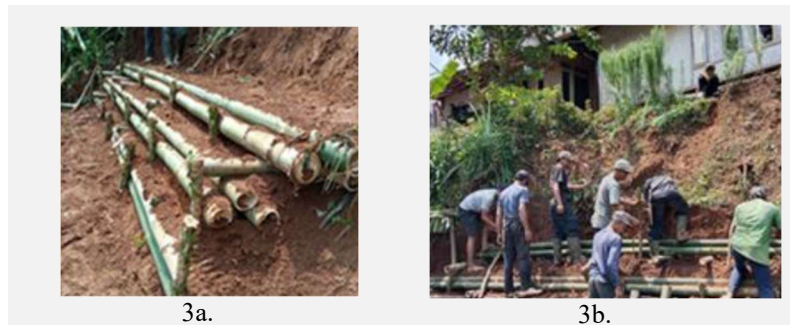
Ditinjau dari aspek botani, bambu diklasifikasikan ke dalam ordo *Graminae* dan famili *Bambuseae*. Tanaman ini tumbuh secara berumpun dengan sistem perakaran serabut. Karakteristik morfologinya mencakup batang silindris yang berongga, bertekstur keras, dengan diameter yang bervariasi dari pangkal hingga ujung. Keunikan biologis bambu terletak pada laju pertumbuhan primernya yang sangat cepat tanpa diikuti pertumbuhan sekunder, di mana tingginya dapat mencapai 20 meter (Oka, 2009).

Salah satu spesies bambu yang paling umum dimanfaatkan dalam konstruksi adalah Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*). Spesies ini telah dibudidayakan secara ekstensif sebagai komoditas perkebunan di kawasan Asia Tenggara, meliputi Thailand, Filipina, dan Indonesia (Malanit, 2009). Di Indonesia sendiri, Bambu Petung tercatat sebagai satu dari tiga spesies bambu dengan populasi terbesar dan persebaran terluas (Judawisastro & Sitohang, 2016). Visualisasi fisik dari morfologi Bambu Petung dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bambu petung (Schröder, 2010)

Implementasi bambu sebagai komponen utama dalam struktur *crib wall* semakin diminati karena faktor ketersediaan material yang melimpah (lokal), efisiensi biaya konstruksi, serta nilai keberlanjutan lingkungan. Bambu sangat mudah ditemukan, khususnya di wilayah tropis, sehingga biaya produksinya jauh lebih ekonomis dibandingkan material konstruksi pabrikan. Selain itu, penggunaan bambu mendukung konsep pelestarian alam (*sustainability*) mengingat sifatnya sebagai sumber daya hayati yang dapat diperbarui (Tardio et al., 2018). Contoh pemasangan dan pelaksanaan terdapat di Gambar 3 dan Gambar 4 di bawah.



Gambar 3a. Perkuatan *Bamboo Crib Wall* di Desa Sinarresmi, Sukabumi, Indonesia (Zayadi et al., 2023)

Gambar 3b. Pelaksanaan pemasangan *Bamboo Crib Wall* di Desa Sinarresmi, Sukabumi, Indonesia (Zayadi et al., 2023)



Gambar 4a. Perkuatan *Bamboo Crib Wall* di Nepal (Tardio et al., 2018)

Gambar 4b. Pelaksanaan pemasangan *Bamboo Crib Wall* di Nepal (Tardio et al., 2018)

Efektivitas penerapan *Bamboo Crib Wall* di lapangan dapat ditinjau melalui studi kasus yang disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Gambar 3 merepresentasikan aplikasi perkuatan lereng di Desa Sinarresmi, Sukabumi, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian Zayadi et al. (2023). Sementara itu, Gambar 4 mengilustrasikan penggunaan teknologi serupa di Nepal yang merujuk pada studi Tardio et al. (2018).

2. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian ini diawali dengan kajian literatur secara komprehensif guna membangun landasan teoretis mengenai sistem dinding penahan tanah, mekanisme perkuatan lereng, serta penetapan parameter desain yang relevan. Selanjutnya, proses akuisisi data dilakukan dengan memanfaatkan data sekunder berupa parameter geoteknik tanah yang berlokasi di Desa Tambakmerang, Kecamatan Girimarto, Wonogiri. Data spesifikasi tanah ini diadopsi dari hasil studi terdahulu yang dilakukan oleh Sagita et al. (2017).

Analisis ini didasarkan pada prinsip-prinsip mekanika tanah untuk mengevaluasi parameter kuat geser dan distribusi tegangan pada massa tanah (Hardiyatmo, 1995). Untuk mendapatkan hasil yang akurat, penelitian ini menggunakan simulasi numerik berbasis perangkat lunak geoteknik yang umum digunakan dalam praktis ketekniksipilan (Nalgire et al., 2020; Świtała & Wu, 2025). Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*) menjadi pendekatan utama yang dipilih karena efektivitasnya dalam memprediksi bidang gelincir dan faktor keamanan dibandingkan dengan metode elemen hingga dalam kasus praktis (Gouw, 2012). Pengembangan desain juga mempertimbangkan efisiensi biaya dengan kemungkinan penggunaan material alternatif atau limbah yang dikombinasikan dalam struktur dinding penahan tanah (Abiezer & Prihatiningsih, 2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berfokus pada evaluasi efektivitas kinerja *Bamboo Crib Wall* sebagai solusi stabilisasi lereng. Analisis dilakukan melalui pendekatan komparatif, yaitu dengan membandingkan respons stabilitas antara kondisi lereng asli (*existing*) dan kondisi lereng setelah diberi perkuatan.

Dalam penelitian ini *bamboo crib wall* digunakan untuk stabilisasi pada lereng, sehingga dibutuhkan pembuktian efektifitas *bamboo crib wall* pada lereng. Kemudian dibandingkan dua buah kondisi tanah tersebut yang diperoleh dari hasil perhitungan. Pada Tabel 3 merupakan data parameter tanah oleh Sagita et al. (2017) yang diperoleh dari tanah Desa Tambakmerang, Grimarto, Wonogiri.

Tabel 3. Data tanah untuk keperluan analisis (Sagita et al., 2017)

Lapisan	Lapisan Tanah Atas	Lapisan Tanah Tengah	Lapisan Tanah Bawah
Berat Isi γ (kN/m ³)	14,42	13,93	14,91
Kohesi c (kN/m ²)	40,21	30,20	26,67
Sudut Geser ϕ (°)	26,27	14,73	27,80

Spesifikasi bambu

Pemilihan Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*) sebagai material utama konstruksi dinding penahan sementara didasarkan pada keunggulan sifat mekanisnya yang mumpuni serta nilai ekonomisnya yang lebih efisien dibandingkan material konvensional lainnya (Morisco, 1999). Kekuatan material ini bahkan dinilai cukup kompetitif untuk diaplikasikan sebagai substitusi tulangan baja pada elemen struktur beton (Budi et al., 2013).

Pemanfaatan bambu dalam rekayasa geoteknik telah ditinjau secara luas di berbagai negara, seperti dalam penggunaan *bamboo bioengineering* untuk restorasi ekologi di pegunungan Himalaya (Singh et al., 2025) serta tinjauan teknis stabilisasi lereng di Malaysia (Mickovski et al., 2022). Secara spesifik, penggunaan *Bamboo Crib Wall* telah terbukti menjadi metode *soil bioengineering* yang berkelanjutan untuk menstabilkan lereng di wilayah Nepal (Acharya, 2020). Namun, desain struktur ini perlu memperhatikan isu temporal atau penurunan kekuatan material seiring berjalannya waktu agar fungsi proteksinya tetap optimal (Gabrieli et al., 2021). Selain aspek mekanis, interaksi antara hidrologi vegetasi dan sistem infiltrasi tanah juga menjadi faktor krusial yang mempengaruhi kestabilan lereng (Abdela et al., 2025). Di Indonesia, kombinasi bambu dengan tanaman pendukung seperti kaliandra telah diimplementasikan sebagai upaya mitigasi longsor berbasis masyarakat di wilayah Sukabumi (Zayadi et al., 2023). Selain itu, perlindungan infrastruktur jalan yang berdekatan dengan badan air juga memerlukan pemilihan metode perkuatan yang tepat untuk mencegah erosi lebih lanjut (Logeswaran & Kulathilaka, 2024).

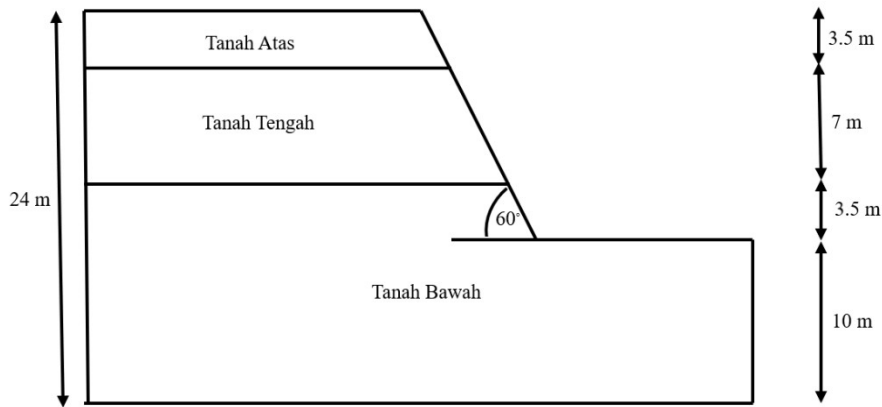
Data spesifikasi teknis material mengacu pada hasil pengujian laboratorium yang dilakukan oleh Irawati dan Saputra (2012). Spesimen Bambu Petung yang digunakan memiliki kriteria usia tanam 3–5 tahun, dengan rata-rata kadar air sebesar 15,38% dan kerapatan massa (*density*) mencapai 0,72 gr/cm³. Untuk diameter dari bambu petung sendiri sebesar 10-15 cm dengan ketebalan 1,5-2,0 cm. Rekapitulasi sifat mekanika bambu tersebut disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Sifat mekanika bambu Petung (Irawati & Saputra, 2012)

Sifat mekanika	(MPa)
Kuat lentur	134,972
Kuat tarik sejajar serat	228
Kuat tekan sejajar serat	49,206
Kuat tekan tegak lurus serat	24,185
Kuat geser sejajar serat	9,505
Modulus elastisitas lentur	12888,477

Pemodelan lereng

Setelah parameter tanah dan material terdefinisi, tahap selanjutnya adalah simulasi numerik untuk menganalisis Faktor Keamanan (FK). Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak geoteknik dengan skenario pembebanan pada kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan. Geometri lereng didesain dengan ketinggian total (H) sebesar 14 meter dan sudut inklinasi kemiringan lereng sebesar 60°. Kondisi eksisting lereng terdapat pada Gambar 5 dibawah.

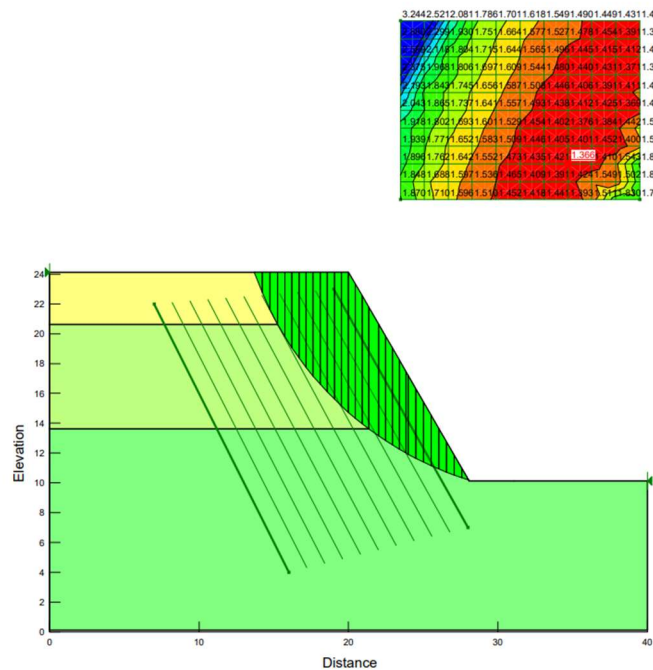


Gambar 5. Kondisi eksisting lereng (Sagita et al., 2017)

Hasil analisis lereng

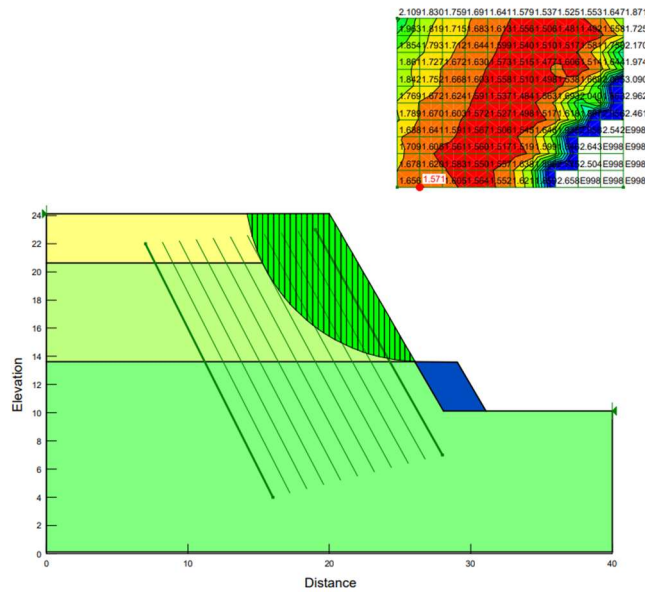
Peta kontur yang dihasilkan dari perangkat lunak geoteknik (pada Gambar 6 hingga 8) merupakan alat visualisasi penting yang menunjukkan distribusi nilai Faktor Keamanan (FK) di seluruh massa lereng yang dianalisis. Dalam analisis stabilitas lereng menggunakan Metode Kestimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*), setiap warna pada kontur berkorelasi langsung dengan tingkat risiko keruntuhan.

Secara spesifik, warna merah atau jingga kemerahan merepresentasikan nilai FK terendah. Area yang ditandai dengan warna ini adalah bidang gelincir kritis, yang menandakan jalur keruntuhan yang paling mungkin terjadi atau titik terlemah pada lereng. Sebaliknya, warna yang bergeser ke spektrum yang lebih tinggi menunjukkan peningkatan stabilitas. Warna kuning atau hijau muda mengindikasikan nilai FK yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa area lereng tersebut relatif lebih stabil. Sementara itu, warna hijau tua hingga biru mewakili nilai FK tertinggi, yang mengklasifikasikan area lereng sebagai sangat aman dan stabil.



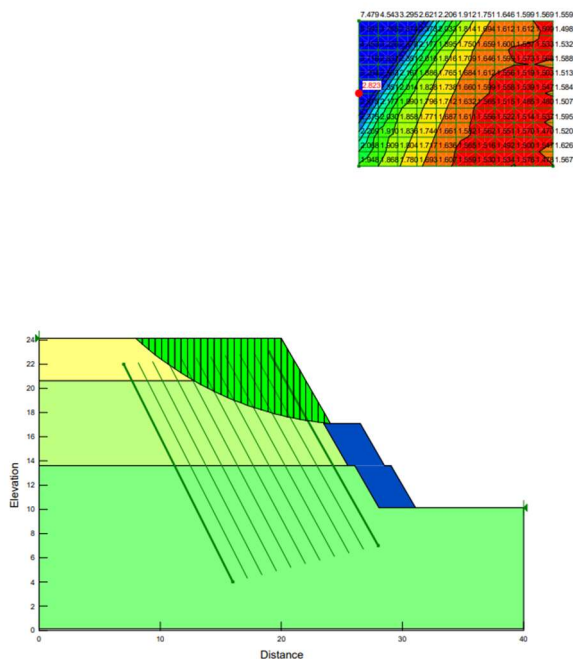
Gambar 6. Analisis kondisi lereng tanpa perkuatan

Berdasarkan Gambar 6, kondisi lereng eksisting dengan tinggi 14 meter dan sudut kemiringan 60° menghasilkan nilai $FK = 1,366$.



Gambar 7. Analisis kondisi dengan perkuatan *bamboo crib wall* H = 4 m, B = 3 m

Berdasarkan Gambar 7, kondisi lereng dengan perkuatan *bamboo crib wall* yang berukuran H = 4 m, B = 3 m, menghasilkan $FK = 1,571$.



Gambar 8. Analisis kondisi dengan perkuatan *bamboo crib wall* H = 4 m, B = 3 m, 2 Trap

Berdasarkan Gambar 8, kondisi lereng dengan perkuatan *bamboo crib wall* yang berukuran 2 Trap, menghasilkan $FK = 2,823$.

Dari hasil analisis, dapat diamati bahwa bidang gelincir kritis pada kondisi eksisting (Gambar 6) melewati seluruh tinggi lereng dengan radius yang relatif besar. Setelah penambahan perkuatan 1 trap (Gambar 7), bidang gelincir masih melewati bagian atas dinding, mengindikasikan bahwa perkuatan tunggal belum mampu mengalihkan

mekanisme keruntuhan secara optimal. Namun, pada desain 2 trap (Gambar 8), bidang gelincir kritis bergeser ke posisi yang lebih dangkal dengan radius yang lebih kecil, menunjukkan bahwa sistem terasering efektif dalam mengontrol dan membatasi zona keruntuhan potensial. Hasil rekapitulasi dari stabilitas lereng dapat dilihat di Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Analisis Stabilitas Lereng

Hasil Analisis Stabilitas Lereng		Status (Bowles)	Status (SNI)
Variasi Pemodelan	Nilai <i>Safety Factor</i>	FK > 1.25	FK ≥ 2
Lereng Eksisting (H = 14 m)	1,366	Aman	Tidak Aman
Perkuatan <i>Bamboo Crib Wall</i> (1 Trap, H = 4m, B = 3 m)	1,571	Aman	Tidak Aman
Perkuatan <i>Bamboo Crib Wall</i> (2 Trap, H = 4m, B = 3 m)	2,823	Sangat Aman	Sangat Aman

Peningkatan faktor keamanan yang signifikan pada desain 2 trap (FK = 2,823) dibandingkan dengan 1 trap (FK = 1,571) menunjukkan keunggulan sistem terasering dalam mendistribusikan beban dan mengurangi momen penggerak pada lereng. Sistem bertingkat menciptakan beberapa zona perkuatan yang bekerja secara berlapis, dimana setiap trap berfungsi sebagai penghalang independen terhadap bidang gelincir potensial. Hal ini mengakibatkan gaya penggerak (*driving force*) terdistribusi ke dalam segmen-segmen yang lebih kecil, sementara gaya penahan (*resisting force*) meningkat secara kumulatif dari kombinasi massa bambu *crib wall* dan material pengisi pada setiap tingkat.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan efektivitas *Bamboo Crib Wall* dalam meningkatkan stabilitas lereng, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil. Analisis dilakukan tanpa memperhitungkan degradasi material bambu seiring waktu dan pengaruh muka air tanah, dimana kondisi jenuh air dapat menurunkan stabilitas lereng secara signifikan. Selain itu, pengaruh beban dinamis seperti gempa bumi dan interaksi sistem perakaran vegetasi dengan bambu *crib wall* belum dimodelkan secara eksplisit. Penelitian ini juga terbatas pada analisis kondisi jangka pendek, sehingga evaluasi kinerja jangka panjang masih diperlukan untuk memastikan durabilitas dan efektivitas perkuatan dalam kondisi operasional aktual.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil analisis pada kondisi lereng eksisting dengan tinggi 14 meter dan sudut kemiringan 60° menunjukkan nilai Faktor Keamanan (FK) sebesar 1,366. Mengacu pada klasifikasi Bowles (1989), nilai ini berada pada kategori "Lereng relatif stabil" karena $FK > 1,25$. Namun, jika mengacu pada SNI 8460:2017 untuk lereng permanen dengan tingkat ketidakpastian tinggi, nilai ini belum memenuhi syarat keamanan minimum yaitu $FK \geq 2,0$, sehingga memerlukan intervensi perkuatan.
- Penerapan perkuatan menggunakan dinding penahan tanah tipe *Bamboo Crib Wall* di kaki lereng terbukti meningkatkan stabilitas lereng. Hasil analisis pada model 1 trap dengan dimensi H = 4 m dan B = 3 m menghasilkan FK sebesar 1,571. Meskipun terjadi peningkatan dari kondisi eksisting, nilai ini masih belum memenuhi syarat keamanan minimum SNI 8460:2017 untuk tingkat ketidakpastian tinggi yaitu $FK \geq 2,0$.
- Penerapan model 2 trap pada lereng eksisting menghasilkan nilai keamanan yang paling optimal yaitu 2,823. Nilai ini telah memenuhi dan berada jauh di atas syarat minimum SNI 8460:2017 untuk kondisi dengan tingkat ketidakpastian tinggi ($FK \geq 2,0$), yang menunjukkan bahwa penambahan trap (terasering) pada *crib wall* memberikan distribusi beban dan penahan yang lebih baik dibandingkan model 1 trap atau kondisi eksisting. Sistem bertingkat ini menciptakan mekanisme perkuatan berlapis yang lebih efektif dalam menahan gaya penggerak pada lereng curam.
- Modifikasi *Bamboo Crib Wall* model bertingkat merupakan solusi paling efektif dan direkomendasikan untuk aplikasi pada lereng dengan kemiringan curam dan ketinggian signifikan, terutama untuk kondisi dengan tingkat ketidakpastian tinggi seperti kondisi geologi yang kompleks, kondisi tanah tidak seragam, atau data penyelidikan tanah yang terbatas. Pendekatan terasering tidak hanya meningkatkan faktor keamanan secara substansial hingga memenuhi standar SNI 8460:2017, tetapi juga memberikan margin keamanan yang lebih besar terhadap variabilitas kondisi lapangan dan ketidakpastian parameter geoteknik. Selain itu, penggunaan bambu sebagai material utama mendukung prinsip keberlanjutan dan ramah lingkungan dalam praktik rekayasa geoteknik *modern*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdela, H., Ayana, T., Melese, T., & Abebe, D. (2025). Vegetation hydrology and slope interaction under variable infiltration: A state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6(1), Article 9. <https://doi.org/10.1186/s43065-025-00152-0>
- Abiezer, D., & Prihatiningsih, A. (2022). Analisis desain dinding penahan tanah dengan waste material. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4), 767-780. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i4.20272>
- Acharya, M. S. (2018). Analytical approach to design vegetative crib walls. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(1), 483-496. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0342-5>
- Acharya, M. S. (2020). Bamboo crib wall: A sustainable soil bioengineering method to stabilize slopes in Nepal. *Journal of Development Innovations*, 4(1), 99-118. <https://www.karmaquest.org/journal/index.php/ILGDI/article/view/56>
- Al-Shukur, A. K., & Al-Rammah, A. M. (2017). Optimum design of gravity wall founded on specially random soil subjected to earthquake load. *Journal of Kerbala University*, 15(2), 212-214.
- Ardhyananta, H., Sulistijono, & Susilo, G. H. (2012). Karakterisasi dan sifat mekanik bambu ori dan bambu petung. *Seminar Pascasarjana XII*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik (SNI 8460:2017)*.
- Bowles, J. E. (1989). *Sifat-sifat fisik dan geoteknis tanah (J. K. Hainim, Penerjemah)*. Erlangga.
- Budi, A. S., Sambowo, K. A., & Kurniawati, I. (2013). Model balok beton bertulangan bambu sebagai pengganti tulangan baja. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 7*.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering (Vol. 7th ed.)*. Cengage Learning.
- Gabrieli, F., Allievi, L., Mazzorana, B., & Cosma, M. (2021). Design and temporal issues in soil bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. *Ecological Engineering*, 169, Article 106313. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106313>
- Gouw, T. L. (2012). Analisa stabilitas lereng dengan limit equilibrium dan finite element method.
- Hardiyatmo, H. C. (1995). *Mekanika Tanah II*. Gadjah Mada University Press.
- Huang, Y. H. (2014). Slope stability analysis by the limit equilibrium method. *American Society of Civil Engineers*.
- Irawati, I. S., & Saputra, A. (2012). Analisis statistik sifat mekanika bambu petung. *Prosiding Simposium Nasional Rekayasa dan Budidaya Bambu I*.
- Judawisastro, H., & Sitohang, U. A. (2016). Karakteristik sifat tarik serat bambu petung (*Dendrocalamus asper*). *Program Studi Teknik Material*.
- Logeswaran, J., & Kulathilaka, S. A. S. (2024). Investigation of suitable methods to protect main roads adjacent to water bodies: A case study from Uva Province, Sri Lanka. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 57(1), 43-54. <https://doi.org/10.4038/engineer.v57i1.7574>
- Malanit, P. (2009). *The structural manufacture of oriented strand board made from zephyr strand of bamboos* [Doctoral dissertation, University of Hamburg].
- Mickovski, S. B., Stokes, A., van Beek, R., Ghestem, M., & Fourcaud, T. (2022). A review of bioengineering techniques for slope stability in Malaysia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 12861-12878. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04235-3>
- Morisco. (1999). *Rekayasa bambu*. Penerbit Nafiri.
- Nalgire, P., Kolekar, Y., Patil, A., & Kadam, M. (2020). *Slope stability analysis by GeoSlope*. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/341383564>
- Oka, G. M. (2009). *Bambu sebagai Bahan Komposit*. Denpasar: Universitas Udayana.
- Sagita, L., Tjahjono, T., & Wahyudi, S. (2017). Analisis stabilitas dan biaya perencanaan dinding penahan tanah tipe bronjong di Sungai Ciliwung. *Komposit: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 1(1), 1-10.
- Schröder, S. (2010). *Dendrocalamus asper - Rough bamboo*. *Guadua Bamboo*. <https://www.guaduabamboo.com/blog/dendrocalamus-asper>
- Singh, C., Yesi, P., Phuntsho, S., & Gurung, D. B. (2025). Ecological restoration of fragile eastern Himalayan landscapes through bamboo bioengineering—lessons from Bhutan. *Trees, Forests and People*, 22, Article 101028. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.101028>
- Surendro, B. (2015). *Rekayasa geoteknik lereng*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Świtała, B. M., & Wu, W. (2025). Numerical study on stability of slope using geo-technical software. *Proceedings of International Conference on Sustainable Infrastructure*.
- Tardio, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Fernandes, J. P., & Acharya, M. S. (2018). The use of bamboo for erosion control and slope stabilization: Soil bioengineering works. *Dalam A. Khalil (Ed.)*, 119-142. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75626>
- Zayadi, R., Andayani, S., & Indrawati, E. (2023). Pemanfaatan tanaman bambu dan kaliandra untuk perkuatan lereng sebagai upaya mitigasi terhadap longsor di Desa Sinarresmi Sukabumi. *PengabdianMu: Jurnal Ilmiah Pengabdian kepada Masyarakat*, 8(4), 514-522. <https://doi.org/10.33084/pengabdianmu.v8i4.4542>