

COST-EFFECTIVENESS RATIO (CER) PEMBANGUNAN BANGUNAN PERLINDUNGAN LERENG

Komang Arya Utama¹, Dwianto² dan Reny Khairina Damayanti³

^{1,2} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Jenderal Sudirman No. 06, Kota Gorontalo, Indonesia

³ Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Gorontalo, Jl. Tinaloga No. 16, Bone Bolango, 96554, Indonesia

ABSTRACT

The construction of slope protection is an essential measure for maintaining soil stability and infrastructure integrity in landslide-prone areas. However, cost efficiency often becomes a point of contention due to variations in construction treatment types, geotechnical conditions, execution methods, and material selection. This study aims to analyze the cost-effectiveness of various slope reinforcement alternatives using the Cost-Effectiveness Ratio (CER) approach. The analysis was conducted on three critical slope locations along the national road sections of Gorontalo Province: Sta. 32+140, Sta. 34+340, and Sta. 5+540. Numerical simulations using Plaxis 8.2 software were employed to calculate the Safety Factor (SF) under both static and dynamic conditions. The results indicate that the implementation of slope protection measures increased the SF values by 30–73% (static) and 3–24% (dynamic). CER values demonstrated efficiency variations ranging from 3.7% to 54.68%, with the combination of retaining walls and bored piles yielding the highest cost-effectiveness. This study emphasizes the importance of design selection based on cost-effectiveness analysis in planning landslide mitigation for national roads to achieve effective and efficient designs.

Keywords : landslide, slope reinforcement, cost efficiency, Cost-Effectiveness Ratio, Plaxis 8.2

ABSTRAK

Pembangunan konstruksi perlindungan lereng merupakan salah satu upaya penting dalam menjaga stabilitas tanah dan infrastruktur di daerah rawan longsor. Namun permasalahan efisiensi biaya sering kali menjadi hal yang dipertentangkan akibat perbedaan jenis penanganan konstruksi, kondisi geoteknis, metode pelaksanaan, serta pemilihan material yang digunakan.. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas biaya dari berbagai alternatif perkuatan lereng menggunakan pendekatan Cost-Effectiveness Ratio (CER). Analisis dilakukan pada tiga lokasi lereng kritis di ruas jalan nasional Provinsi Gorontalo, yaitu Sta. 32+140, Sta. 34+340, dan Sta. 5+540. Simulasi numerik dengan perangkat lunak Plaxis 8.2 digunakan untuk menghitung faktor keamanan (safety factor/SF) baik pada kondisi statis maupun dinamis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan konstruksi perlindungan lereng mampu meningkatkan nilai SF sebesar 30–73% (statis) dan 3–24% (dinamis). Nilai CER memperlihatkan variasi efisiensi antara 3,7% hingga 54,68%, di mana kombinasi dinding penahan tanah dengan bored pile memberikan efektivitas biaya tertinggi. Studi ini menegaskan pentingnya pemilihan desain berbasis analisis biaya-efektivitas dalam perencanaan penanganan longsor jalan nasional guna menghasilkan desain yang efektif dan efisien.

Kata kunci: tanah longsor, perkuatan lereng, efisiensi biaya, *cost-effectiveness ratio*, Plaxis 8.2

Correspondence : Komang Arya Utama
Email : komangaryautama@ung.ac.id

1 PENDAHULUAN

Lereng adalah bagian dari muka bumi yang memiliki kemiringan tertentu terhadap referensi bidang datar. Lereng menjadi bagian dari bentang alam yang terbentuk baik secara alamiah, maupun dengan cara dibuat oleh manusia dengan tujuan tertentu. Terbentuknya lereng ini, sebagai bentuk dari kondisi alamiah maupun sengaja dibuat untuk kebutuhan tertentu di antaranya untuk tanggul penahan maupun meningkatkan stabilitas timbunan (Ryskandi, 2003).

Kondisi ketidakstabilan yang dialami oleh lereng bisa dikategorikan ke dalam dua bentuk fenomena, yaitu: (1) terjadinya kenaikan tegangan pada tanah, ini disebabkan oleh bertambahnya beban oleh bangunan/struktur, perubahan kecuraman lereng, dan terjadi gempa. Kemudian (2) adalah menurunnya kekuatan tahanan tanah, hal ini disebabkan oleh karena kenaikan tekanan air pori, pencairan, absorpsi air, hilangnya sementasi material, dan proses pelapukan (Duncan, et al., 2014).

Lereng yang tidak stabil bisa mengalami keruntuhan yang biasa disebut sebagai tanah longsor. Tanah longsor didefinisikan sebagai pergerakan massa dari material geologi secara tiba-tiba dan cepat di sebuah lereng akibat gaya tarikan gravitasi bumi. Hal ini adalah hasil dari ketidakstabilan dan kegagalan batuan di sepanjang permukaan atau bidang tersebut (Montgomery, 2006).

Ketidakstabilan lereng dan atau kelongsoran yang menyertainya terjadi ketika tahanan gesek material (tanah dan batuan) diatasi oleh gaya atau momen pengganggu (tegangan geser) yang mencapai besaran yang melebihi kekuatan geser material tersebut (Murthy, 2014). Kegagalan dan kelongsoran terjadi ketika tegangan melebihi kekuatan geser yang dimobilisasi mengurangi faktor keamanan menjadi kurang dari satu (Oborie & Abija, 2019).

Kerugian yang ditimbulkan oleh longsor pada infrastruktur jalan sangat besar, baik itu berupa kerugian langsung maupun kerugian tak-langsung. Kerugian langsung yang diderita antara lain rusaknya badan jalan, hilang harta benda masyarakat sekitar jalan, dan terputusnya jalur konektivitas infrastruktur masyarakat.

Sedangkan kerugian tak-langsung yang dapat diderita antara lain kegiatan perekonomian masyarakat terganggu, masyarakat bisa jadi terisolasi, atau biaya transportasi yang jadi lebih mahal (Ma & Mei, 2021).

Perkuatan lereng adalah sebuah upaya atau tindakan yang dilakukan untuk mencegah atau mengurangi risiko terjadinya erosi dan tanah longsor (Hardiyatmo, 2003). Lereng sangat rentan terhadap berbagai kejadian alam seperti tanah longsor, erosi tanah, dan guguran batuan. Ketidakstabilan lereng dapat menimbulkan risiko kerusakan infrastruktur, kecelakaan, hingga korban jiwa, sehingga perkuatan lereng menjadi aspek penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek infrastruktur dan konstruksi sipil.

Perlindungan lereng ini bisa dilakukan dengan berbagai usaha teknis baik secara struktur maupun non-struktur (Azzmi, et al., 2011). Tujuan dari perkuatan lereng adalah untuk melindungi kehidupan, properti, dan lingkungan dari kerusakan yang disebabkan oleh bencana alam yang terjadi akibat ketidakstabilan lereng (Hidayat, et al., 2023).

Beragam metode telah dilakukan untuk melakukan perlindungan terhadap ancaman longsor pada lereng jalan, seperti pembuatan dinding pasangan batu (*gravity wall*), pemasangan pemakuan tanah (*soil nailing*); perlindungan erosi permukaan dengan *shotcrete*, pembangunan *mechanical stabilized earth* (MSE) wall (Setiawan, et al., 2018), (Sharma, et al., 2021), (Hidayat, et al., 2023). Selain itu, perlindungan lereng juga dapat dilakukan secara *eco-engineering*, dengan melakukan perlindungan lereng menggunakan tanaman seperti pohon bambu, rumput Vetiver, dan rumput Grama Biru (Islam & Badhon, 2017), (Wang & Liu, 2018).

Biaya konstruksi merupakan hal paling penting yang harus dipertimbangkan sebelum dibangun dan ditempati. Biaya konstruksi didefinisikan sebagai jumlah biaya yang harus dibayarkan kepada pelaksana proyek untuk membangun suatu bangunan dengan perlengkapan yang telah ditetapkan. Biaya konstruksi merujuk pada semua biaya yang terkait dengan membangun atau merenovasi struktur fisik seperti bangunan, jembatan, jalan, atau infrastruktur lainnya. Ini mencakup berbagai

elemen seperti bahan bangunan, tenaga kerja, peralatan, keuntungan, biaya administrasi, dan biaya lainnya yang terkait dengan proses konstruksi. Namun, biaya pembangunan konstruksi perlindungan lereng ini masih menimbulkan persoalan krusial terkait efektivitas biaya yang belum terjawab secara komprehensif.

Sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada analisis teknis dan kekuatan struktur seperti *Factor of Safety* (FoS) atau deformasi tanah, tanpa mempertimbangkan keseimbangan antara biaya dan kinerja jangka panjang. Selain itu, pendekatan evaluasi biaya yang digunakan sering kali hanya menyoroti biaya awal (*initial cost*), sementara faktor biaya siklus hidup (*life cycle cost*), risiko iklim ekstrim, dan dampak lingkungan belum secara utuh terintegrasi dalam kerangka analisis efektivitas biaya. Hal ini menyebabkan keputusan desain konstruksi sering kali tidak sepenuhnya mencerminkan efisiensi dan keberlanjutan proyek dalam jangka panjang (Robson et al., 2024; Yao et al., 2024).

Kesenjangan penelitian lainnya terletak pada keterbatasan perbandingan lintas metode perlindungan lereng seperti *soil nailing*, *mechanically stabilized earth (MSE) wall*, *geosynthetics*, serta teknik *bio-engineering*. Beberapa studi melaporkan efektivitas biaya metode konvensional tertentu, namun umumnya dilakukan pada kasus tunggal dengan kondisi geoteknis yang spesifik (Bahramipour et al., 2025; Chau et al., 2024). Akibatnya, belum ada kerangka analisis *cost-effectiveness ratio (CER)* yang mampu membandingkan berbagai alternatif perlindungan lereng secara kuantitatif dan terstandarisasi (Olinic et al., 2024; Yazdani et al., 2024).

Cost-Effectiveness Ratio (CER) adalah pendekatan kuantitatif yang digunakan untuk membandingkan beberapa alternatif perkuatan lereng dengan mempertimbangkan biaya total dan efektivitas teknis, yaitu peningkatan faktor keamanan (SF). CER memberikan ukuran “biaya yang dikeluarkan untuk setiap satuan efektivitas”, dalam hal ini stabilitas lereng.

$$CER = \frac{TC}{SF}$$

Keterangan:

CER = *Cost-Effectiveness Ratio*

TC = Total Cost dari pembangunan struktur perkuatan

SF = Faktor keamanan

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan kerangka *Cost-Effectiveness Ratio (CER)* yang komprehensif dalam mengevaluasi berbagai alternatif konstruksi perlindungan lereng. Penelitian ini akan membandingkan nilai efektivitas biaya antar-metode perlindungan lereng. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata bagi ilmu pengetahuan dan pengambil kebijakan dalam memilih solusi perlindungan lereng yang tidak hanya aman secara teknis tetapi juga ekonomis dan berkelanjutan.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif-deskriptif, yaitu penelitian yang menggunakan data dan analisis numerik untuk menguji hipotesis yang menggambarkan fenomena atau situasi tertentu secara sistematis tanpa mencari hubungan atau pengaruh antar-variabel/parameter perkuatan lereng dalam menentukan tingkat kerentanan dan metode perlindungannya.

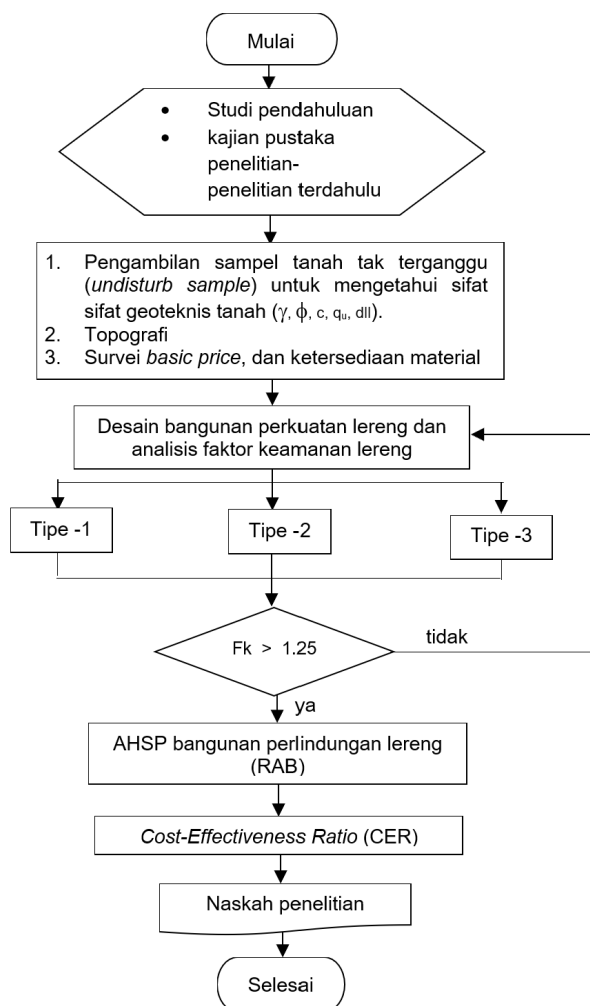
Objek dalam penelitian ini adalah lereng-lereng yang terdapat di sepanjang Jalan Nasional yang berada pada Ruas Lintas Utara Jalan Nasional Provinsi Gorontalo. Lereng yang dianalisis adalah L1 yaitu Ruas Bulontio-Tolinggula pada Sta. 32+140; kemudian lokasi L2 yaitu Ruas Bulontio-Tolinggula pada Sta. 34+340; dan terakhir adalah lokasi L3 yaitu Ruas Tolango-Bulontio pada Sta. 5+540.

Tahapan penelitian ini diawali dengan studi pendahuluan dan pengambilan data lapangan yang meliputi pengukuran sifat geoteknis tanah seperti berat isi (γ), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), serta kondisi topografi dan vegetasi sekitar terutama terkait kemiringan lereng. Data tersebut kemudian digunakan untuk analisis stabilitas lereng dan perencanaan beberapa alternatif perlindungan lereng menggunakan *software* Plaxis 8.2 guna memperoleh nilai *Factor of Safety* (FoS) baik sebelum maupun setelah dilakukan perkuatan.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan

biaya pembangunan konstruksi perlindungan lereng berdasarkan *Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP)* Standar Nasional Indonesia (SNI) 2020 sebagai dasar penilaian keekonomian setiap alternatif.

Berdasarkan hasil tersebut, dilakukan analisis efektivitas biaya dengan cara membandingkan antara total biaya pembangunan dan nilai faktor keamanan dari masing-masing tipe konstruksi perlindungan. Akhirnya, konstruksi yang paling efektif ditentukan sebagai metode yang menghasilkan persentase efektivitas biaya tertinggi, yaitu dengan biaya paling efisien namun tetap mampu memberikan stabilitas lereng yang optimal.

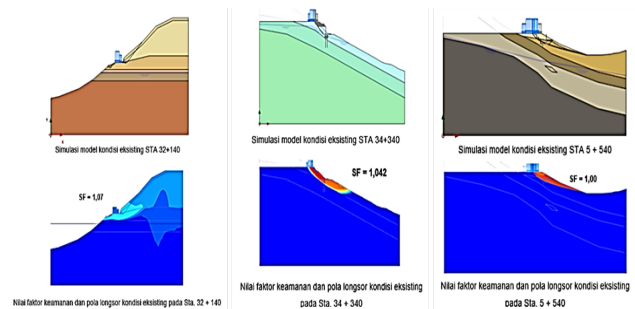


Gambar 1. Bagan alir penelitian

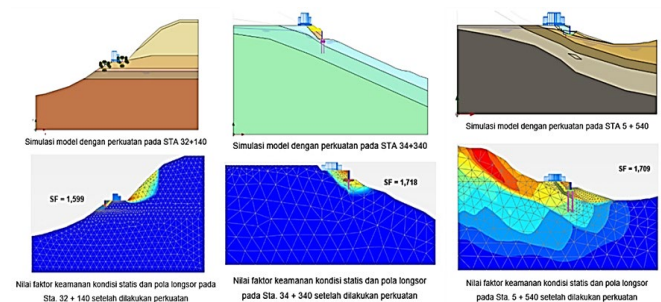
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil evaluasi analisis kestabilan

lereng dengan menghitung nilai faktor keamanan (*safety factor*, SF) pada masing-masing lokasi. Hasil analisis kestabilan lereng tersebut disajikan dalam analisis berikut ini.



Gambar 2. Nilai SF kondisi existing lereng dengan kerentanan sangat tinggi dalam penelitian ini



Gambar 3. Nilai SF kondisi dengan perkuatan lereng

Berdasarkan Gambar 2, terlihat bahwa lereng-lereng ini memiliki nilai SF yang sangat rendah, yaitu bernilai 1,0 – 1,07 dalam kondisi alamiahnya (tanpa pemberian perkuatan). Hal ini menyebabkan lereng tersebut sangat rentang mengalami kelongsoran. Kelongkosoran yang mungkin terjadi bisa disebabkan oleh sedikit saja gangguan luar.

Sedangkan pada Gambar 3 di atas terlihat bahwa setelah dilakukan rekayasa geoteknik dengan mengaplikasikan konstruksi perlindungan lereng, maka diperoleh peningkatan nilai keamaan lereng. Peningkatan tersebut bernilai 1,5 – 1,7. Berikut nilai-nilai SF perlindungan lereng di tiga lokasi lereng yang ditinjau yang memiliki nilai kerentanan sangat tinggi.

DPT yang digunakan beberapa opsi fondasi yaitu tiang pancang, *bored pile* serta *shearkey* sebagai elemen penahan geser yang meningkatkan stabilitas terhadap pergeseran

dasar lereng. Pemilihan tipe fondasi didasarkan pada karakteristik tanah, ketersediaan material, kemampuan tenaga kerja di lokasi terpencil, dan kemudahan mobilisasi alat berat.

Tabel 1. Hasil analisis nilai faktor keamanan (SF) perlindungan lereng

No	Kode Lereng	Ruas Jalan	Kondisi Lereng	Faktor keamanan (SF)	
				Kon disis statis	Kon disidina mis (gempa)
1	L1	Bulontio – Tolinggula (Sta. 32+140)	Tanpa perlindungan/eksisting	1,07	< 1
			Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,55	1,09
			DPT + <i>Shearkey</i>	1,60	1,11
			DPT + Pancang	1,60	1,10
2	L2	Bulontio – Tolinggula (Sta. 34+340)	Tanpa perlindungan/eksisting	1,04	< 1
			Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,35	1,03
			DPT + <i>Bored Pile</i>	1,72	1,16
			DPT + Sumuran	1,80	1,15
3	L3	Tolango-Bulontio (Sta. 5+540)	Tanpa perlindungan/eksisting	1,00	<1
			Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,51	<1
			DPT + Pancang	1,71	1,11
			DPT + <i>Bored Pile</i>	1,76	1,24

Hasil yang disajikan pada Tabel 1 di atas memperlihatkan bahwa dengan berbagai alternatif penanganan perlindungan lereng, diperoleh nilai faktor-faktor keamanan yang berbeda-beda sesuai dengan tipe/jenis konstruksi perlindungan yang direncanakan.

Secara umum hasil analisis perkuatan lereng memberikan peningkatan nilai faktor keamanan 30% - 73% untuk kondisi statis dan 3%-24% untuk kondisi dinamis (gempa).

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian lain yang menggunakan DPT dengan fondasi tiang pancang dan perkuatan geotekstil pada lereng tanah lempung memberi peningkatan 50% (Widodo et al., 2020). Penelitian lain oleh Susanti dan Rifa'i (2019) juga melaporkan efektivitas DPT beton bertulang dalam menahan gaya geser lateral pada lereng dengan kemiringan di atas 35°, di mana nilai FK meningkat dari 1,1 menjadi 1,6 atau sebesar 45,45%. Namun, dibandingkan dengan hasil Pratama (2021) yang menggunakan metode *soil nailing* dengan peningkatan FK hanya mencapai 1,4 atau cuma sebesar 27,27%, sistem DPT dengan tiang pancang pada penelitian ini menunjukkan stabilitas lebih tinggi dan ketahanan jangka panjang yang lebih baik terhadap erosi dan tekanan air pori.

Perhitungan biaya pembangunan konstruksi perlindungan lereng termasuk tahap penting dalam perencanaan teknik sipil. Tujuan dari perhitungan ini adalah untuk memperoleh estimasi total biaya yang dibutuhkan guna merealisasikan suatu sistem perkuatan lereng berdasarkan alternatif desain yang telah direncanakan. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 2. Perhitungan *Cost-Effectiveness Ratio* (CER) bertujuan untuk menilai efisiensi biaya suatu sistem perkuatan lereng. Berikut disajikan nilai CER

Tabel 2. Cost-Effectiveness Ratio (CER) desain perlindungan lereng

No	Kode Lereng	Ruas Jalan	Kondisi Lereng	Faktor Aman (SF)	Biaya Konstruksi (Rp)	<i>Cost-Effective Ratio (CER)</i> (Rp/SF)	Efisiensi
1	L23	Bulontio - Tolinggula (Sta. 32+140)	Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,55	1.062.940.271	685.767.916,77	21,53%
			DPT + <i>Shearkey</i>	1,60	1.169.857.924	731.161.202,50	16,34%
			DPT + Pancang	1,60	1.398.290.721	873.931.700,63	0,0%
2	L17	Bulontio - Tolinggula (Sta. 34+340)	Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,35	1.879.349.972	1.392.111.090,37	54,68%
			DPT + <i>Bored Pile</i>	1,72	5.283.191.942	3.071.623.222,09	0,0%
			DPT + Sumuran	1,80	3.011.212.299	1.672.895.721,67	45,54%
3	L4	Bulontio - Tolinggula (Sta. 5+540)	Dinding Penahan Tanah (DPT)	1,51	3.918.269.750	2.594.880.629,14	0,0%
			DPT + Pancang	1,71	4.271.014.957	2.497.669.565,50	3,70%
			DPT + <i>Bored Pile</i>	1,76	4.333.396.056.	2.462.156.850,00	5,11%

Berdasarkan Tabel 2, nilai CER sangat membantu dalam menentukan usulan desain konstruksi mana yang layak untuk dipilih berdasarkan aspek kategori biaya. Terlihat bahwa dengan berbagai alternatif, kita bisa melihat nilai efisiensi dari desain yang diusulkan. Nilai efisiensi ini diperoleh dari perbandingan nilai selisih CER masing-masing alternatif yang diusulkan terhadap nilai CER terbesar untuk tiap penanganan per lereng. Misalnya nilai efisiensi 21,5% pada usulan penanganan di Lereng L23 adalah hasil dari perbandingan $(\text{CER DPT} + \text{Pancang} - \text{CER DPT}) / (\text{CER DPT} + \text{Pancang})$. Tingkat efisiensi usulan desain terhadap tiga lokasi lereng yang diteliti bervariasi dari 3,7% - 54,68%. Hasil analisis dari penelitian lain menunjukkan bahwa penerapan Dinding Penahan Tanah (DPT) dengan fondasi tiang pancang memberikan nilai faktor keamanan (FK) sebesar 1,72 dengan total biaya konstruksi Rp 1,35 miliar, menghasilkan nilai *Cost-Effectiveness Ratio* (CER) sebesar 0,78 miliar/FK. Nilai ini menunjukkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan hasil penelitian Ramdhan dan Puspita (2021) yang menganalisis perkuatan lereng menggunakan sistem soil nailing dengan CER sebesar 1,02 miliar/FK, di mana peningkatan kestabilan hanya mencapai FK 1,58. Sementara itu, penelitian Siregar et al. (2022) yang menerapkan metode bored pile retaining wall memperoleh FK 1,80 dengan CER sebesar 0,92 miliar/FK. Dengan demikian, kombinasi DPT dan tiang pancang pada penelitian ini dinilai lebih ekonomis dalam meningkatkan kestabilan lereng, karena mampu mencapai tingkat keamanan yang mendekati optimal dengan biaya yang lebih rendah. Hasil ini juga menegaskan bahwa pendekatan perkuatan yang mempertimbangkan rasio biaya terhadap efektivitas teknis dapat menjadi dasar pengambilan keputusan desain yang lebih rasional, khususnya pada proyek di wilayah dengan keterbatasan sumber daya dan kondisi medan sulit.

Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara nilai faktor keamanan (*safety factor*/SF) dan *Cost-Effectiveness Ratio* (CER). Secara teoritis, peningkatan SF merupakan indikator

bertambahnya stabilitas lereng (Bowles, 1996), namun dalam praktik lapangan peningkatan ini tidak selalu sejalan dengan efisiensi biaya. Pada lokasi Sta. 32+140 dan Sta. 34+340, penerapan Dinding Penahan Tanah (DPT) sederhana memberikan nilai CER yang relatif rendah meskipun nilai SF moderat. Sebaliknya, kombinasi metode seperti DPT + *bored pile* memang meningkatkan SF, tetapi lonjakan biaya konstruksi justru menghasilkan CER yang tinggi, sehingga efisiensi menurun. Fenomena ini sejalan dengan konsep optimasi teknis-ekonomi, di mana efektivitas biaya dicapai ketika peningkatan kinerja struktur masih sepadan dengan investasi tambahan (Suryolelono, 2014). Pada lokasi Sta. 5+540, kondisi berbeda ditemukan: kombinasi DPT + *bored pile* menghasilkan peningkatan SF yang signifikan dan disertai nilai CER yang lebih baik dibandingkan DPT tunggal. Hal ini membuktikan bahwa pada lereng dengan tingkat kerawanan tinggi, tambahan biaya konstruksi dapat dibenarkan karena peningkatan SF memberikan manfaat ekonomis jangka panjang melalui pengurangan risiko kegagalan (Das, 2010). Dengan demikian, hubungan SF-CER dapat dikatakan bersifat kontekstual dan *site-specific*, bergantung pada kondisi geoteknik, geometri lereng, serta tingkat risiko yang dihadapi.

Berdasarkan hasil tersebut, pemilihan desain perlindungan lereng sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan target SF semata, tetapi juga harus dioptimalkan terhadap nilai CER. Untuk lereng dengan risiko rendah hingga sedang, metode sederhana seperti DPT cukup memadai karena menghasilkan keseimbangan antara stabilitas dan biaya. Namun, untuk lereng dengan risiko tinggi, kombinasi metode seperti DPT + *bored pile* direkomendasikan meskipun biayanya lebih besar, karena peningkatan SF yang diperoleh berdampak signifikan terhadap pengurangan potensi kerugian di masa depan. Evaluasi ini menegaskan perlunya pendekatan berbasis lokasi (*site-specific design*), yang selaras dengan prinsip desain geoteknik modern: aman secara teknis, efisien secara ekonomi, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

4 KESIMPULAN

Hasil penelitian yang diperoleh adalah:

1. Penerapan konstruksi perlindungan lereng dengan berbagai usulan konstruksi mampu meningkatkan nilai SF sebesar 30–73% (statis) dan 3–24% (dinamis).
2. Hasil analisis nilai CER memperlihatkan variasi efisiensi antara 3,7% hingga 54,68%, di mana kombinasi dinding penahan tanah dengan *bored pile* memberikan efektivitas biaya tertinggi

Saran yang bisa diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penelitian selanjutnya disarankan membandingkan nilai *Cost-Effectiveness Ratio* (CER) dari beberapa metode perkuatan lereng yang lain yang belum diusulkan untuk memperoleh alternatif yang lebih efisien secara teknis dan ekonomis.
2. Perlu dilakukan kajian lanjutan dengan mempertimbangkan biaya pemeliharaan jangka panjang agar analisis efektivitas biaya lebih realistis terhadap kondisi lapangan sebenarnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Azzmi, N. N., Noor, M. N. & Jamaludin, N., 2011. *Geotechnical Approaches for Slope Stabilization in Residential Area*. Malaysia, Procedia Engineering 20, pp. 474-482.
- Bahramipour, O., Moezzi, R., Jalali, F. M., Khaksar, R. Y., & Gheibi, M., 2025. Parametric Evaluation of Soil Nail Configurations for Excavation and Slope Stability. *Infrastructures*, 10(4), 45.
- Bowles, J.E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition. McGraw-Hill.
- Chau, T. L., Nguyen, T., & Pham, V., 2024. Physical and Numerical Models of Mechanically Stabilized Earth Walls Using Local Reinforcement Materials. *Applied Sciences*, 14(3), 1283.
- Chen, J., Gong, Q., Wang, J., & Yuan, S., 2024. Damage cause and mechanism of well-vegetated soil slopes under extreme rainfall. *Frontiers in Earth Science*, 12, 1402798.
- Das, B.M., 2010. *Principles of Geotechnical Engineering*. 7th Edition. Cengage Learning
- Duncan, J. M., Wright, S. G. & Brandon, T. L., 2014. *Soil Strength and Slope Stability*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Hardiyatmo, H. C., 2003. *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hidayat, W., Sudisman, A. R. & Aristo, A., 2023. Perencanaan dan Analisis Perkuatan Lereng Menggunakan Fondasi Micropiles. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 21(2), pp. 129-136.
- Islam, M. S. & Badhon, F. F., 2017. *Sandy Slope Stability Using Vegetation*. Dhaka, Bangladesh, Researchgate.
- Keybondori, S., Abdi, E., Deljouei, A., Cislighi, A., Shakeri, Z., & Etemad, Z., 2025. Soil-bioengineering to stabilize gravel roadside slopes in cold regions. *Ecological Engineering*, 214.
- Ma, Z. & Mei, G., 2021. Deep learning for geological hazards analysis: Data, models, applications, and opportunities. *Journal of Earth-Science Reviews*, pp. 1-33.
- Montgomery, C. W., 2006. *Environmental Geology*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Companies INC.
- Murthy, V. N. S., 2014. *Textbook of Soil mechanics and Foundation Engineering: Geotechnical Engineering series*. New Delhi: CBS Publishers and Distributors Pvt Ltd.
- Murti, A. W., 2023. *Analisis Perbandingan Alternatif Perkuatan Stabilitas Lereng pada Rest Area Jalan Tol Semarang - Solo*, Semarang: Fakultas Teknik.
- Oborie, E. & Abija, F. A., 2019. *Slope stability analysis of the Afaha Ekpenedi integrated analysis of the Afaha Ekpenedi integrated*. Abuja, s.n., p. 27.
- Olinic, T., Olinic, E. D., & Butcaru, A. C., 2024. Integrating Geosynthetics and Vegetation for Sustainable Ecological Slope Treatment. *Sustainability*, 16(23), 10621.
- Pratama, D., 2021. Studi perbandingan stabilitas lereng dengan metode soil nailing dan dinding penahan tanah menggunakan Plaxis 8.2. *Jurnal Mekanika Tanah Indonesia*, 9(1), 55–63.

- Ramdhan, M., & Puspita, R., 2021. Analisis efektivitas biaya perkuatan lereng dengan metode soil nailing menggunakan Plaxis 2D. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 15(2), 75–84.
- Robson, E. B., Milledge, D. G., Utili, S., & Brundl, M., 2024. Cost-benefit methodology for road slope stabilisation. *Transportation Geotechnics*, 10.
- Ryskandi, 2003. Prospek usaha tani jagung sebagai tanaman sela di antara tegakan kelapa. *Buletin Teknik Pertanian*, 8(2), pp. 55-59.
- Setiawan, L. C., Sentosa, S. G. & Iskandar, A., 2018. Analisis Stabilitas Lereng Batuan dengan Metode Perkuatan Ground Anchor dan Soil Nailing di Labuan Bajo, NTT. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, Volume 1, pp. 102-110.
- Sharma, D., Dhital, B. & Suberi, T., 2021. Stabilization of Road Slope failure by Soil Nailing Technique with Shotcrete Frame: A Case Study of Right Bank Slope at Telegangchu Bridge Construction Project, Trongsa. *GNH Journal of Construction Technology & Management*, 3(2), pp. 23-27.
- Siregar, H., Santoso, D., & Lestari, M., 2022. Evaluasi cost-effectiveness berbagai metode perlindungan lereng menggunakan bored pile retaining wall. *Jurnal Teknik Infrastruktur dan Konstruksi*, 10(1), 45–56.
- Susanti, L., & Rifa'i, M., 2019. Efektivitas dinding penahan tanah beton bertulang terhadap stabilitas lereng tanah lempung. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 15(3), 201–210.
- Taylor, T. P., 2023. *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls*. U.S.
- Wang, Y. & Liu, X., 2018. *Plant Slope Protection in Highway Engineering*. San Francisco, CA, IOP Publishing.
- Widodo, A., Hadi, R., & Nugroho, A., 2020. Analisis kestabilan lereng dengan perkuatan kombinasi tiang pancang dan geotekstil menggunakan Plaxis 2D. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 8(2), 115–124.
- Yao, Y., Xu, P., Hu, H., & Qi, Q., 2024. Advancements and Applications of Life-Cycle Assessment in Ecological Slope Treatments. *Sustainability*, 16(1), 398. MDPI
- Yazdani, F., Panahi, P. A., & Sadeghi, A., 2024. A comparative study of environmental and economic performance of slope stabilization options: vegetation vs conventional. *Journal of Environmental Management*. 359.