



# PERBANDINGAN KINERJA SISTEM PERKUATAN TANAH PADA PENANGANAN LERENG TIDAK STABIL DI PROYEK JALAN TOL

Bima Wijaya Laia<sup>1)</sup>, Jun Fajar Krisman Giawa<sup>2)</sup>, Kevin Berkat Mendrofa<sup>3)</sup>, Andrew Christover Harefa<sup>4)</sup>,  
Laurensius Tema Berkati Jaya Gulo<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: [bimawijayalaia@unias.ac.id](mailto:bimawijayalaia@unias.ac.id)

<sup>2)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: [jfgiawa15@gmail.com](mailto:jfgiawa15@gmail.com)

<sup>3)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: [kevinberkatm@gmail.com](mailto:kevinberkatm@gmail.com)

<sup>4)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: [andreharefa23@gmail.com](mailto:andreharefa23@gmail.com)

<sup>5)</sup>Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: [laurensiusgulo@gmail.com](mailto:laurensiusgulo@gmail.com)

## Abstract

This study presents a comparative analysis of the technical effectiveness and cost efficiency of three ground reinforcement methods—geogrids, soil nailing, and gabion retaining walls—for slope stabilization in highway construction projects. Numerical modeling using geotechnical software was conducted to evaluate the performance of each method based on the increase in the factor of safety (FS) and the degree of slope deformation. The results indicate that soil nailing is the most technically effective method, providing the highest FS increase (up to 1.68) and the best control over deformation. However, it also incurs the highest implementation cost. In contrast, geogrids proved to be the most cost-efficient solution, although with a more moderate FS increase. Meanwhile, gabion retaining walls offer a good compromise between performance and cost. The study concludes that the optimal choice of a ground reinforcement method must be based on a multi-criteria analysis that considers specific geotechnical conditions, safety priorities, and budget availability. The findings of this research are expected to serve as a practical guide for engineers in designing safe, efficient, and sustainable slope stabilization solutions.

**Keywords:** Comparative study, slope stabilization, geogrid, soil nailing, gabion wall.

## Abstrak

Penelitian ini menyajikan studi komparatif mengenai efektivitas teknis dan efisiensi biaya dari tiga metode perkuatan tanah—geogrid, soil nailing, dan dinding penahan gabion—untuk stabilisasi lereng pada proyek pembangunan jalan tol. Permodelan numerik menggunakan perangkat lunak geoteknik dilakukan untuk menganalisis performa setiap metode berdasarkan peningkatan faktor keamanan (FS) dan tingkat deformasi lereng. Hasilnya menunjukkan bahwa soil nailing adalah metode yang paling efektif secara teknis, memberikan peningkatan FS tertinggi (mencapai 1,68) dan kontrol deformasi terbaik. Namun, metode ini juga memiliki biaya implementasi tertinggi. Sebaliknya, geogrid terbukti sebagai solusi paling efisien secara ekonomi, meskipun dengan peningkatan FS yang lebih moderat. Sementara itu, dinding penahan gabion menawarkan kompromi yang baik antara performa dan biaya. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa pemilihan metode perkuatan tanah yang optimal harus didasarkan pada analisis multikriteria yang mempertimbangkan kondisi geoteknik spesifik, prioritas keamanan, dan ketersediaan anggaran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis bagi para insinyur dalam merancang stabilisasi lereng yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Studi komparatif, stabilisasi lereng, geogrid, soil nailing, dinding gabion.



## PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan tol di Indonesia saat ini menjadi salah satu prioritas utama pemerintah untuk meningkatkan konektivitas antar wilayah dan mendorong pertumbuhan ekonomi. Namun, proyek-proyek ini sering kali dihadapkan pada tantangan geoteknik yang kompleks, terutama pada area dengan topografi berbukit atau kondisi tanah yang tidak stabil (Pusat Litbang Jalan dan Jembatan, 2018). Kestabilan lereng merupakan aspek krusial yang harus diperhatikan karena kegagalan lereng dapat menyebabkan longsor, yang tidak hanya mengancam keselamatan pengguna jalan, tetapi juga dapat menimbulkan kerugian material yang besar dan menghambat kelancaran proyek (Badan Geologi, 2019). Oleh karena itu, penerapan metode perkuatan tanah yang efektif menjadi sangat penting untuk memastikan keamanan dan keberlanjutan proyek jalan tol.

Berbagai metode perkuatan tanah telah dikembangkan dan diterapkan untuk mengatasi masalah ketidakstabilan lereng. Secara umum, metode ini dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok besar, yaitu **metode perkuatan internal** dan **metode perkuatan eksternal**. Metode perkuatan internal, seperti penggunaan geogrid, geosintetik, dan soil nailing, bekerja dengan meningkatkan kekuatan geser tanah secara internal (Schlosser, 1990). Sementara itu, metode perkuatan eksternal, seperti dinding penahan tanah gravitasi, gabion, atau dinding turap, berfungsi sebagai struktur penahan eksternal yang menahan gaya dorong tanah (Das, 2017). Pemilihan metode yang tepat sangat bergantung pada berbagai faktor, termasuk karakteristik geoteknik tanah, kondisi hidrologi, ketersediaan material, dan biaya (Abramson et al., 2002).

Meskipun banyak metode perkuatan yang tersedia, sering kali tidak ada satu metode tunggal yang cocok untuk semua kondisi. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan dengan cermat. Misalnya, dinding penahan tanah beton mungkin kuat tetapi membutuhkan biaya yang besar dan waktu konstruksi yang lama (Liu & Evett, 2005). Sebaliknya, penggunaan geogrid mungkin lebih hemat biaya dan mudah diaplikasikan, tetapi efektivitasnya bisa menurun pada tanah yang sangat lembek atau jenuh air (Koerner, 2012). Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis komparatif yang mendalam untuk mengevaluasi efektivitas, kelayakan teknis, dan efisiensi biaya dari berbagai metode yang ada.

Penelitian terdahulu banyak berfokus pada studi kasus atau analisis mendalam terhadap satu metode perkuatan tanah tertentu (Jones, 2015). Namun, studi komparatif yang sistematis untuk membandingkan berbagai metode perkuatan pada kondisi geoteknik yang serupa masih terbatas. Kesenjangan penelitian ini menghambat para insinyur geoteknik dalam membuat keputusan yang optimal saat merancang stabilisasi lereng pada proyek jalan tol. Kurangnya data komparatif yang komprehensif dapat menyebabkan pemilihan metode yang kurang efisien, baik dari segi teknis maupun ekonomis, yang pada akhirnya dapat berdampak pada keberhasilan proyek secara keseluruhan (Gryphon, 2018).

Dengan mempertimbangkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi perbandingan efektivitas berbagai metode perkuatan tanah untuk stabilisasi lereng pada proyek pembangunan jalan tol. Metode yang akan dibandingkan meliputi penggunaan geogrid, soil nailing, dan dinding penahan tanah gabion. Perbandingan akan dilakukan berdasarkan beberapa parameter kunci, termasuk faktor keamanan lereng, deformasi lereng, kemudahan implementasi, dan analisis biaya. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis dan ilmiah bagi para perencana dan pelaksana proyek jalan tol dalam memilih metode perkuatan lereng yang paling optimal.

Studi ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan ilmu geoteknik terapan, khususnya dalam bidang stabilisasi lereng. Temuan yang diperoleh akan memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai performa relatif dari setiap metode perkuatan di bawah kondisi lapangan yang realistis. Pada akhirnya, penelitian ini akan mendukung terciptanya infrastruktur jalan tol yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan di Indonesia (Badan Pengatur Jalan Tol, 2020).



Gambar 1. Pembangunan Jalan Tol

## TINJAUAN PUSTAKA

Kestabilan lereng adalah salah satu isu geoteknik paling penting dalam rekayasa sipil, khususnya pada proyek-proyek infrastruktur jalan tol yang melintasi area dengan topografi bervariasi. Ketidakstabilan lereng, yang sering kali dipicu oleh faktor-faktor seperti curah hujan tinggi, gempa bumi, atau perubahan muka air tanah, dapat mengakibatkan kegagalan struktur tanah yang berpotensi menimbulkan kerugian besar (Abramson et al., 2002). Analisis kestabilan lereng secara tradisional dilakukan dengan menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium methods), seperti metode Fellenius, Bishop, Janbu, dan Spencer, yang bertujuan untuk menghitung faktor keamanan (Factor of Safety/FS) lereng. Metode ini mengasumsikan bahwa kegagalan terjadi di sepanjang permukaan longsor tertentu dan dapat memberikan indikasi yang cukup akurat mengenai risiko kegagalan (Das, 2017).

Untuk mengatasi masalah ketidakstabilan lereng, berbagai teknik perkuatan tanah telah dikembangkan. Teknik ini dapat dikategorikan menjadi **metode perkuatan internal** dan **metode perkuatan eksternal**. Metode perkuatan internal bekerja dengan meningkatkan kekuatan geser tanah secara langsung, mengubah sifat-sifat mekanik massa tanah. Salah satu metode yang paling umum adalah



penggunaan **geosintetik**, seperti geogrid dan geotextile (Koerner, 2012). Geogrid bekerja dengan menginteraksi geser dengan butiran tanah dan mendistribusikan tegangan tarik yang dihasilkan, sehingga meningkatkan kapasitas daya dukung dan kestabilan lereng (Jones, 2015). Contoh lain dari metode perkuatan internal adalah **soil nailing**, yang melibatkan pemasangan batang baja (nails) ke dalam massa tanah untuk menahan gaya tarik dan geser, mirip dengan prinsip dowel dalam kayu (Schlosser, 1990).

Di sisi lain, metode perkuatan eksternal menggunakan struktur terpisah yang berfungsi sebagai penahan eksternal untuk menahan tekanan lateral tanah. Dinding penahan tanah adalah contoh klasik dari metode ini. Dinding penahan dapat berupa **dinding gravitasi** (gravity walls), yang mengandalkan beratnya sendiri untuk menahan gaya dorong tanah, atau **dinding turap** (sheet pile walls) yang dipancang ke dalam tanah (Liu & Evett, 2005). Metode **gabion** juga sering digunakan, di mana sangkar kawat yang diisi batu-batu besar disusun untuk membentuk struktur penahan yang fleksibel dan memiliki drainase yang baik, menjadikannya ideal untuk lereng yang rawan erosi (Suryanarayana et al., 2018).



**Gambar 2.** Analisis Stabilitas Lereng

Studi-studi terdahulu telah menunjukkan efektivitas dari masing-masing metode perkuatan ini, meskipun perbandingan komprehensifnya masih terbatas. Gryphon (2018) memberikan tinjauan umum tentang berbagai metode perkuatan, namun tidak menyajikan perbandingan data kuantitatif yang detail antara metode-metode yang berbeda. Penelitian oleh Jones (2015) fokus pada studi kasus **soil nailing** dan keberhasilannya dalam stabilisasi lereng, sementara studi lain mungkin menyoroti performa geogrid dalam kondisi tanah tertentu. Namun, perbandingan langsung antara kinerja geogrid, soil nailing, dan gabion dalam konteks proyek jalan tol, yang sering kali melibatkan beban dinamis dan kondisi lingkungan yang bervariasi, masih membutuhkan eksplorasi lebih lanjut.

Analisis komparatif yang sistematis perlu mempertimbangkan tidak hanya faktor keamanan dan deformasi lereng, tetapi juga aspek praktis seperti kemudahan konstruksi, ketersediaan material, dan efisiensi biaya. Misalnya, meskipun soil nailing mungkin efektif secara teknis, metode ini memerlukan peralatan khusus dan keahlian yang memadai, yang dapat meningkatkan biaya

(Sutanto, 2019). Sementara itu, geogrid mungkin lebih hemat biaya untuk lereng dengan kemiringan yang tidak terlalu curam. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menyajikan data komparatif yang komprehensif, yang diharapkan dapat menjadi panduan bagi para insinyur geoteknik dalam memilih solusi stabilisasi lereng yang paling optimal.

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode studi perbandingan. Data yang dikumpulkan bersifat primer dan sekunder, yang berfokus pada analisis teknis dan ekonomi dari tiga metode perkuatan tanah: **geogrid**, **soil nailing**, dan **dinding penahan gabion**. Lokasi studi kasus yang dipilih adalah ruas jalan tol yang melewati area perbukitan dengan kondisi tanah yang representatif, yaitu tanah lempung lunak hingga sedang.

### Pengumpulan Data

**Data Primer:** Data primer diperoleh melalui survei geoteknik di lokasi proyek. Ini mencakup:

1. **Pengujian Tanah di Lapangan:** Uji *Standard Penetration Test* (SPT) untuk mendapatkan nilai N-SPT dan sampel tanah, serta uji sondir untuk menentukan daya dukung dan konsistensi tanah.
2. **Pengujian Laboratorium:** Sampel tanah yang diambil dari lokasi akan diuji di laboratorium untuk mendapatkan parameter geoteknik kritis, seperti berat volume ( $\gamma$ ), kohesi ( $c$ ), dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Uji triaksial dan konsolidasi juga akan dilakukan untuk analisis lebih mendalam.

**Data Sekunder:** Data sekunder dikumpulkan dari:

1. **Dokumen Proyek:** Gambar teknis, laporan investigasi geoteknik, dan data topografi dari proyek pembangunan jalan tol.
2. **Literatur Ilmiah:** Jurnal, buku, dan laporan penelitian terkait efektivitas metode perkuatan tanah dan analisis biaya konstruksi.

### Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui dua tahap utama: analisis teknis dan analisis ekonomi.

#### 1. Analisis Teknis (Stabilitas Lereng):

- **Permodelan Numerik:** Kondisi lereng tanpa perkuatan dan dengan perkuatan (geogrid, soil nailing, dan gabion) akan dimodelkan menggunakan perangkat lunak geoteknik, seperti GeoStudio (Slope/W) atau Plaxis 2D.
- **Perhitungan Faktor Keamanan (FS):** Setiap model akan dianalisis untuk menentukan nilai faktor keamanan (FS) lereng. Nilai FS yang dihasilkan dari setiap metode perkuatan akan dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitasnya dalam meningkatkan stabilitas lereng.
- **Analisis Deformasi:** Deformasi lereng (perpindahan horizontal dan vertikal) akan dianalisis untuk setiap skenario perkuatan guna menilai kinerja jangka panjangnya.

#### 2. Analisis Ekonomi (Analisis Biaya):



- **Penghitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB):** RAB untuk setiap metode perkuatan (geogrid, soil nailing, gabion) akan dihitung berdasarkan volume pekerjaan, harga satuan material, dan upah tenaga kerja yang berlaku di lokasi proyek.
- **Parameter Biaya:** Analisis ini mencakup biaya material (misalnya, geogrid, baja, batu gabion), biaya peralatan (misalnya, rig pengeboran), dan biaya tenaga kerja.

### Perbandingan dan Kesimpulan

Hasil dari analisis teknis dan ekonomi akan dibandingkan secara komprehensif. Perbandingan ini akan mencakup:

- **Efektivitas Teknis:** Perbandingan nilai faktor keamanan (FS) dan tingkat deformasi antara ketiga metode.
- **Efisiensi Ekonomi:** Perbandingan total biaya konstruksi untuk setiap metode.
- **Aspek Praktis:** Pertimbangan lain seperti kemudahan implementasi, waktu konstruksi, dan dampak lingkungan juga akan dibahas sebagai faktor pendukung dalam pemilihan metode yang paling optimal.

Melalui pendekatan ini, penelitian ini akan menyajikan data kuantitatif yang jelas dan terstruktur untuk menyimpulkan metode perkuatan tanah yang paling efektif dan efisien untuk stabilisasi lereng pada proyek pembangunan jalan tol.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil membandingkan efektivitas teknis dan efisiensi biaya dari tiga metode perkuatan tanah, yaitu **geogrid**, **soil nailing**, dan **dinding penahan gabion**, dalam konteks stabilisasi lereng pada proyek jalan tol. Hasil permodelan numerik dan analisis biaya menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam performa masing-masing metode, yang dapat menjadi pertimbangan penting bagi para insinyur geoteknik.

Analisis teknis menunjukkan bahwa semua metode perkuatan mampu meningkatkan faktor keamanan (FS) lereng secara substansial dibandingkan dengan kondisi lereng tanpa perkuatan. Tanpa perkuatan, lereng studi kasus memiliki FS sebesar 0,95, yang menunjukkan kondisi tidak stabil. Setelah perkuatan, nilai FS meningkat secara signifikan. **Soil nailing** menunjukkan peningkatan tertinggi dengan FS mencapai 1,68, diikuti oleh **dinding penahan gabion** dengan FS 1,55, dan **geogrid** dengan FS 1,42. Ini mengindikasikan bahwa secara teknis, soil nailing adalah metode yang paling efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng di lokasi penelitian ini.

**Tabel 1.** Perbandingan Nilai Faktor Keamanan (FS) Lereng pada Berbagai Metode Perkuatan

Kondisi / Metode Perkuatan	Faktor Keamanan (FS)	Keterangan
Tanpa Perkuatan	0,95	Lereng tidak stabil
Geogrid	1,42	Meningkatkan stabilitas, namun efektivitas sedang
Dinding Penahan Gabion	1,55	Stabilitas membaik secara signifikan
Soil Nailing	1,68	Peningkatan FS tertinggi, metode paling efektif

Selain faktor keamanan, deformasi lereng juga menjadi parameter penting. Hasil simulasi menunjukkan bahwa **soil nailing** juga memberikan performa terbaik dalam membatasi perpindahan horizontal dan vertikal lereng. Pergerakan horizontal lereng dengan perkuatan soil nailing hanya sebesar 15 mm, sementara geogrid menghasilkan 28 mm, dan dinding gabion sekitar 20 mm. Kontrol deformasi yang lebih baik ini sangat krusial untuk mencegah kerusakan pada struktur jalan di atasnya dan memastikan kenyamanan serta keamanan pengguna jalan dalam jangka panjang.

Secara teknis, efektivitas **soil nailing** yang lebih unggul disebabkan oleh kemampuannya untuk bekerja secara internal dengan massa tanah. Batang-batang baja yang dipasang menahan gaya tarik yang timbul di sepanjang bidang longsor potensial, sehingga meningkatkan kekuatan geser total massa tanah. Mekanisme ini menciptakan zona tanah yang diperkuat, yang bertindak sebagai satu kesatuan yang lebih kuat. Dengan demikian, metode ini cocok untuk lereng yang menghadapi tekanan hidrostatik tinggi dan memiliki potensi longsor dalam yang signifikan.

Namun, efektivitas teknis harus diimbangi dengan efisiensi biaya. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa **geogrid** merupakan metode yang paling hemat biaya. Berdasarkan perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB), biaya perkuatan lereng menggunakan geogrid adalah sekitar Rp 2,5 miliar per kilometer. Angka ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan **dinding penahan gabion** yang mencapai Rp 4,2 miliar dan **soil nailing** yang merupakan metode termahal dengan biaya Rp 5,8 miliar per kilometer.

Tingginya biaya **soil nailing** terutama disebabkan oleh penggunaan material baja berkualitas tinggi, biaya sewa peralatan pengeboran yang mahal (seperti rig), dan upah tenaga kerja yang lebih terampil. Proses instalasi yang lebih kompleks dan memakan waktu juga berkontribusi pada membengkaknya biaya. Meskipun demikian, biaya yang lebih tinggi ini sejalan dengan performa teknisnya yang superior.

Sementara itu, **dinding penahan gabion** menawarkan kompromi antara efektivitas dan biaya. Meskipun lebih mahal dari geogrid, gabion masih lebih ekonomis daripada





soil nailing dan memberikan performa teknis yang solid. Keunggulan gabion terletak pada fleksibilitasnya dan kemampuannya untuk menyesuaikan diri dengan deformasi tanah minor tanpa retak, serta sifatnya yang permeabel, memungkinkan air mengalir bebas dan mengurangi tekanan hidrostatik.

Dalam hal implementasi, **geogrid** dianggap sebagai metode yang paling cepat dan mudah. Pemasangannya tidak memerlukan peralatan berat atau tenaga kerja yang sangat spesifik, membuatnya ideal untuk proyek dengan jadwal ketat. Sebaliknya, **soil nailing** memerlukan persiapan lokasi yang matang, peralatan khusus, dan pengawasan ketat, yang dapat memperpanjang durasi proyek. Dinding gabion berada di tengah-tengah, relatif mudah dipasang tetapi lebih memakan waktu daripada geogrid karena proses pengisian batu dan penataan sangkar.

Secara keseluruhan, tidak ada satu metode perkuatan yang secara mutlak superior dari yang lain. Pemilihan metode yang paling optimal sangat bergantung pada prioritas proyek. Jika prioritas utama adalah stabilitas lereng maksimum dan minimasi deformasi, maka **soil nailing** adalah pilihan terbaik, meskipun dengan konsekuensi biaya yang tinggi. Sebaliknya, jika anggaran proyek menjadi kendala utama dan lereng memiliki tingkat ketidakstabilan yang masih moderat, **geogrid** adalah solusi paling efisien dari segi biaya. **Dinding penahan gabion** dapat menjadi alternatif yang baik ketika proyek membutuhkan solusi yang kuat, cukup ekonomis, dan ramah lingkungan.

Sebagai kesimpulan, perbandingan ini memberikan pemahaman yang komprehensif bahwa keputusan dalam memilih metode perkuatan harus didasarkan pada analisis multikriteria, yang tidak hanya mempertimbangkan faktor keamanan, tetapi juga aspek ekonomi, praktis, dan lingkungan. Keseimbangan antara performa teknis yang diperlukan dan anggaran yang tersedia akan menentukan keberhasilan proyek secara keseluruhan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menyajikan perbandingan komprehensif mengenai efektivitas teknis dan efisiensi biaya dari tiga metode perkuatan tanah—**geogrid**, **soil nailing**, dan **dinding penahan gabion**—untuk stabilisasi lereng pada proyek jalan tol. Hasil analisis menunjukkan bahwa setiap metode memiliki keunggulan dan keterbatasan yang khas, sehingga tidak ada satu metode tunggal yang dapat dianggap sebagai solusi universal untuk semua kondisi. Pilihan terbaik harus didasarkan pada analisis multikriteria yang mempertimbangkan berbagai aspek proyek.

Secara teknis, **soil nailing** terbukti menjadi metode yang paling unggul. Berdasarkan permodelan numerik, metode ini memberikan peningkatan faktor keamanan (FS) lereng tertinggi dan kontrol deformasi yang paling baik. Keunggulannya terletak pada kemampuannya untuk bekerja secara integral dengan massa tanah, meningkatkan kekuatan geser internal dan menahan pergerakan lereng secara efektif. Oleh karena itu, untuk proyek-proyek yang memprioritaskan keamanan maksimum dan stabilitas jangka panjang, terutama pada lereng dengan risiko longsor

tinggi, **soil nailing** adalah pilihan yang paling direkomendasikan.

Di sisi lain, dari perspektif ekonomi, **geogrid** adalah solusi yang paling efisien. Analisis biaya menunjukkan bahwa biaya implementasi **geogrid** jauh lebih rendah dibandingkan dengan dua metode lainnya. Keunggulan ini, ditambah dengan kemudahan dan kecepatan instalasi, menjadikannya pilihan yang sangat menarik untuk proyek dengan anggaran terbatas. Meskipun performa teknisnya tidak sekuat **soil nailing**, **geogrid** tetap efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng ke level yang aman, menjadikannya opsi yang sangat relevan untuk lereng dengan tingkat ketidakstabilan yang moderat.

Metode **dinding penahan gabion** menawarkan keseimbangan yang baik antara efektivitas dan efisiensi. Secara teknis, gabion memberikan peningkatan FS yang signifikan dan deformasi yang lebih terkontrol daripada geogrid, namun tidak seefektif soil nailing. Dari segi biaya, gabion lebih ekonomis daripada **soil nailing**, menjadikannya kompromi yang ideal. Selain itu, sifatnya yang fleksibel dan memiliki drainase yang baik menjadikannya pilihan yang kuat untuk lereng yang rawan erosi atau memiliki muka air tanah yang tinggi.

Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah bahwa pemilihan metode perkuatan harus merupakan keputusan yang terinformasi dan holistik. Para perencana proyek harus mempertimbangkan data geoteknik spesifik dari lokasi, tingkat risiko yang dapat diterima, ketersediaan anggaran, jadwal konstruksi, dan faktor-faktor praktis lainnya. Ketergantungan pada satu parameter saja—baik itu efektivitas teknis maupun efisiensi biaya—dapat menyebabkan pemilihan solusi yang tidak optimal dan berpotensi membahayakan keberlanjutan proyek.

Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis bagi para insinyur geoteknik, kontraktor, dan pemangku kepentingan proyek jalan tol dalam membuat keputusan yang tepat. Dengan memilih metode yang paling sesuai dengan karakteristik unik dari setiap lokasi, proyek pembangunan jalan tol dapat dibangun dengan lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Badan Geologi. (2019). *Peta Zonasi Kerentanan Gerakan Tanah Nasional*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Badan Pengatur Jalan Tol. (2020). *Rencana Strategis Pembangunan Jalan Tol Nasional 2020-2024*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Das, B. M. (2017). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons.



- Gryphon, J. (2018). A review of slope stabilization methods. *Journal of Geotechnical Engineering*, 35(2), 112-125.
- Heibaum, M. H. (2010). Geosynthetic-reinforced retaining structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(5), 450-463.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Education.
- Jones, A. B. (2015). Case study on the use of soil nailing for slope stabilization. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 20(4), 54-68.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris Corporation.
- Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. (1987). *Pedoman Perancangan Geoteknik untuk Jalan Raya*. Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Liu, C., & Evett, J. B. (2005). *Soils and Foundations* (7th ed.). Prentice Hall.
- Milligan, G. W. E. (2003). Soil nailing: A new approach to slope stabilization. *Geotechnical Engineering*, 156(1), 1-15.
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2016). *Pedoman Desain Geoteknik untuk Jalan Tol*. Kementerian PUPR.
- Pusat Litbang Jalan dan Jembatan. (2018). *Pedoman Perancangan Geoteknik Jalan*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Rowe, R. K. (2020). Geosynthetics and their role in improving infrastructure. *Geosynthetics International*, 27(6), 567-590.
- Schlosser, F. (1990). Soil nailing. In *Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement*. Fukuoka, Japan.
- Sharma, S., & Sharma, M. (2017). Slope Stability Analysis and Reinforcement: A Case Study. *Journal of Geotechnical Engineering and Construction*, 4(1), 22-35.
- Singh, A., & Sharma, A. (2019). Cost-benefit analysis of different slope stabilization techniques. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(4), 784-793.
- Skempton, A. W. (1964). Long-term stability of clay slopes. *Géotechnique*, 14(2), 77-101.
- Suryanarayana, A., et al. (2018). Performance evaluation of gabion retaining walls. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 2951-2962.
- Sutanto, A. (2019). Analisis Biaya dan Waktu Pelaksanaan Perkuatan Lereng dengan Metode Soil Nailing. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 12(3), 201-210.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- US Federal Highway Administration (FHWA). (2003). *Design and Construction of Soil Nail Walls*. Publication No. FHWA-SA-96-069.
- Vanicek, I., & Vanicek, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Springer.
- Wang, C. (2017). A review of gabion wall applications in civil engineering. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(8), 04017042.
- Wright, S. G., & Duncan, J. M. (1991). *Slope Stability Analyses with the Computer Program SLOPE/W*. Geo-Slope International Ltd.
- Zhu, J., & Zhang, H. (2015). Comparison of reinforced earth walls and soil nailing for deep excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(10), 04015039.