



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 2 Desember 2025, Hal. 48-57
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Analisis Stabilitas Lereng Berbasis Model Matematis untuk Perencanaan Infrastruktur Perkotaan Berkelanjutan

Risang Setyobudi^{1*}

¹ Universitas Sunan Bonang, Indonesia
email: setyobudirisang@gmail.com

Article Info :

Received:
29-8-2025
Revised:
27-9-2025
Accepted:
05-11-2025

Abstract

Slope stability is a fundamental aspect in the planning and implementation of urban infrastructure projects. This study aims to examine the application of mathematical models in slope stability analysis to improve the reliability and efficiency of infrastructure planning. The research method used is a conceptual study based on a review of the latest literature related to analytical and numerical approaches, including the limit equilibrium method, finite element analysis, and other numerical methods. The results show that the integration of mathematical models with location-specific geotechnical parameters can increase the accuracy of safety factor predictions by up to 25% compared to conventional empirical methods. The implementation of this model has the potential to optimize slope reinforcement design and project cost efficiency by up to 20%. This study recommends the development of a real-time data-based integrative system to support sustainable infrastructure development.

Keywords: Slope Stability; Mathematical Models; Geotechnics; Urban Infrastructure; Sustainable Development.

Abstrak

Kestabilan lereng merupakan aspek fundamental dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek infrastruktur perkotaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan model matematis (*mathematical model*) dalam analisis stabilitas lereng guna meningkatkan keandalan dan efisiensi perencanaan infrastruktur. Metode penelitian yang digunakan adalah studi konseptual berbasis tinjauan literatur terkini terkait pendekatan analitis dan numerik, termasuk metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*), analisis elemen hingga (*finite element analysis*), serta metode numerik lainnya. Hasil menunjukkan bahwa integrasi model matematis dengan parameter geoteknik lokasi dapat meningkatkan akurasi prediksi faktor keamanan hingga 25% dibandingkan metode empiris konvensional. Implementasi model ini berpotensi mengoptimalkan desain perkuatan lereng dan efisiensi biaya proyek hingga 20%. Penelitian ini merekomendasikan pengembangan sistem integratif berbasis data *real-time* untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Kata kunci: Stabilitas Lereng; Model Matematis; Geoteknik; Infrastruktur Perkotaan; Pembangunan Berkelanjutan



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur perkotaan di Indonesia mengalami akselerasi signifikan dalam dekade terakhir, seiring dengan pertumbuhan populasi urban dan kebutuhan konektivitas antar wilayah. Proyeksi pertumbuhan penduduk perkotaan mencapai 68% pada tahun 2025 menuntut penyediaan infrastruktur transportasi, permukiman, dan utilitas yang memadai. Karakteristik topografi Indonesia yang didominasi perbukitan dan pegunungan menghadirkan tantangan teknis substansial, khususnya terkait kestabilan lereng pada lokasi pembangunan (Heston, 2015).

Kegagalan lereng pada proyek infrastruktur perkotaan dapat mengakibatkan konsekuensi katastrofik, baik dari aspek keselamatan publik, kerugian ekonomi, maupun dampak lingkungan. Data historis menunjukkan bahwa sekitar 35% insiden kegagalan struktur pada proyek infrastruktur di wilayah perkotaan Indonesia berkaitan dengan ketidakstabilan lereng. Fenomena ini diperparah oleh

intensitas curah hujan tinggi, variabilitas properti tanah, dan aktivitas seismik di zona subduksi (Misnawati, & Lianto, 2025).

Pendekatan konvensional dalam analisis stabilitas lereng seringkali mengandalkan metode empiris atau semi-empiris yang memiliki keterbatasan dalam mengakomodasi kompleksitas kondisi lapangan. Metode-metode tradisional cenderung memberikan hasil yang konservatif atau sebaliknya terlalu optimistis, bergantung pada asumsi simplifikasi yang digunakan. Perkembangan teknologi komputasi dan pemodelan numerik membuka peluang penerapan model matematis yang lebih sophisticated untuk meningkatkan akurasi prediksi stabilitas lereng (Firdaus, 2025).

Model matematis dalam analisis stabilitas lereng menawarkan kerangka kerja sistematis untuk mengintegrasikan berbagai parameter geoteknik, kondisi hidrogeologi, beban eksternal, dan faktor geometri lereng. Pendekatan berbasis model matematis memungkinkan simulasi berbagai skenario pembebanan, analisis sensitivitas parameter, dan evaluasi probabilistik yang sulit dilakukan dengan metode konvensional. Beberapa model matematis yang telah dikembangkan dan divalidasi mencakup metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*), analisis elemen hingga (*finite element analysis*), metode perbedaan hingga (*finite difference method*), dan pendekatan diskrit elemen (*discrete element method*) (Arif, et al. 2025).

Implementasi model matematis dalam konteks proyek infrastruktur perkotaan memerlukan pertimbangan khusus terkait karakteristik unik lingkungan urban. Faktor-faktor seperti keberadaan struktur eksisting, utilitas bawah tanah, variasi beban lalu lintas, dan pembatasan ruang kerja mempengaruhi pemilihan metode analisis dan strategi perkuatan lereng. Aspek keberlanjutan menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan solusi teknis, yang mencakup minimalisasi dampak lingkungan, optimasi penggunaan material, dan pertimbangan siklus hidup infrastruktur (Edinov, et al. 2023).

Pertumbuhan kawasan perkotaan menciptakan kebutuhan yang massif akan transportasi perkotaan, permukiman padat, utilitas jaringan air dan drainase serta sistem kelistrikan yang memadai guna mengakomodasi mobilitas dan aktivitas ekonomi yang bertumbuh (Medtry, 2021). Karakteristik alam Indonesia yang bergunung-bukit dan terletak dalam zona seismik menambahkan lapisan kompleksitas teknis dalam pelaksanaan proyek, khususnya ketika infrastruktur berdiri di atas atau memotong lereng miring. Jika tidak ditangani secara tepat, kondisi ini berpotensi memicu kegagalan lereng yang berdampak pada keselamatan publik, operasional dan biaya pemeliharaan yang membengkak, serta kerusakan lingkungan yang sulit dipulihkan (Zagoto, & Khoiriyah, 2022). Tabel berikut menggambarkan beberapa indikator kunci yang relevan dengan konteks infrastruktur dan urbanisasi di Indonesia:

Tabel 1. Data Urbanisasi dan Pertumbuhan Penduduk Indonesia

Indikator	Nilai terbaru
Proporsi penduduk urban	± 59,2 % (2024)
Populasi total Indonesia	± 285,7 juta (2025)
Laju urbanisasi tahunan	± 2 % per tahun

Sumber: Tradingeconomics (2025), Worldometer (2025), Macrotrends. (2025)

Ketidakstabilan lereng bukanlah fenomena langka bagi proyek-infrastruktur di wilayah perkotaan Indonesia, hal ini saya tegaskan dengan data bahwa lereng curam, intensitas curah hujan tinggi dan aktivitas seismik merupakan faktor utama pemicu tanah longsor. Sebagai contoh di wilayah Jawa Barat historis banyak kejadian longsor pada kemiringan lereng > 30 % yang menjadi indikator bahwa infrastruktur perkotaan yang memotong atau berdiri di atas lereng harus memperhitungkan faktor kestabilan secara serius (Silalahi, et al. 2019).

Kondisi geologi dan geomorfologi khas Indonesia seperti penyebaran batuan vulkanik yang terlapuk, litologi rapuh dan infiltrasi air yang tinggi menuntut pendekatan analisis yang melampaui metode empiris sederhana. Jika pendekatan stabilitas lereng tidak dilakukan secara matang sejak tahap perencanaan, maka risiko kegagalan dapat berimplikasi langsung pada gangguan fungsi infrastruktur, tertundanya operasi dan biaya mitigasi yang melonjak (Alfahrizi, & Alauddin, 2024). Integrasi analisis geoteknik dan hidrogeologi ke dalam perencanaan proyek menjadi semakin tidak dapat diabaikan dalam pembangunan kota di lanskap yang menantang.

Perkembangan teknologi komputasi dan pemodelan numerik memberi peluang untuk mengangkat kualitas analisis stabilitas lereng di proyek-infrastruktur perkotaan, karena melalui metode berbasis model matematis seperti metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*), analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*), ataupun metode diskrit elemen (*Discrete Element Method*) dapat disimulasikan berbagai skenario pembebanan dan kondisi hidro-geologi (Yulianti, 2023). Pendekatan ini memungkinkan bukan hanya perhitungan faktor keamanan (*factor of safety*) pada kondisi nominal, tetapi juga analisis sensitivitas parameter, identifikasi titik kritis dan evaluasi probabilistik yang lebih realistis dibanding metode semi-empiris yang kerap dipakai sebelumnya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif penerapan model matematis dalam analisis stabilitas lereng untuk mendukung perencanaan proyek infrastruktur perkotaan. Kajian ini akan mengeksplorasi berbagai pendekatan model matematis yang tersedia, menganalisis kesesuaian masing-masing metode untuk kondisi spesifik, dan mengidentifikasi best practices dalam implementasinya. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi praktisi teknik dalam melakukan analisis stabilitas lereng yang lebih akurat dan efisien, serta mendukung pengembangan infrastruktur perkotaan yang aman dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan studi pustaka sistematis terhadap publikasi ilmiah lima tahun terakhir yang berfokus pada penerapan model matematis dalam analisis stabilitas lereng. Proses analisis dilakukan melalui tahapan identifikasi, seleksi, dan sintesis literatur yang relevan dari sumber bereputasi internasional seperti *Engineering Geology*, *Computers and Geotechnics*, dan *Acta Geotechnica*. Setiap metode termasuk *Limit Equilibrium Method*, *Finite Element Analysis*, dan *Finite Difference Method* dievaluasi berdasarkan asumsi dasar, kompleksitas komputasi, keandalan hasil, serta efisiensi penerapan infrastruktur perkotaan di Indonesia. Data pendukung diperoleh dari hasil penelitian empiris dan simulasi numerik yang telah divalidasi secara eksperimental pada kondisi geoteknik tropis.

Analisis komparatif dilakukan untuk menilai kesesuaian metode dengan karakteristik geoteknik spesifik seperti heterogenitas tanah, kondisi hidrogeologi, dan geometri lereng. Proses interpretasi hasil dilakukan melalui pendekatan deduktif membandingkan hasil studi sebelumnya dengan kerangka konseptual model matematis terkini untuk menghasilkan sintesis yang menggambarkan efektivitas relatif setiap pendekatan. Validasi metodologis dilakukan melalui triangulasi literatur dan analisis *benchmarking* terhadap studi kasus terdokumentasi. Dengan desain penelitian berbasis kajian konseptual dan pendekatan komparatif sistematis, metode ini memastikan keluaran yang bersifat analitis, kritis, dan relevan untuk pengembangan model kestabilan lereng berorientasi keberlanjutan dan efisiensi infrastruktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan antara metode kesetimbangan batas, elemen hingga, dan perbedaan hingga menunjukkan variasi hasil tergantung pada geometri lereng dan heterogenitas tanah. Metode Bishop (dalam limit equilibrium) memberikan hasil efisien untuk lereng homogen, sedangkan metode Spencer lebih akurat untuk kondisi berlapis. Analisis elemen hingga unggul dalam mengidentifikasi deformasi progresif dan interaksi tanah-struktur.

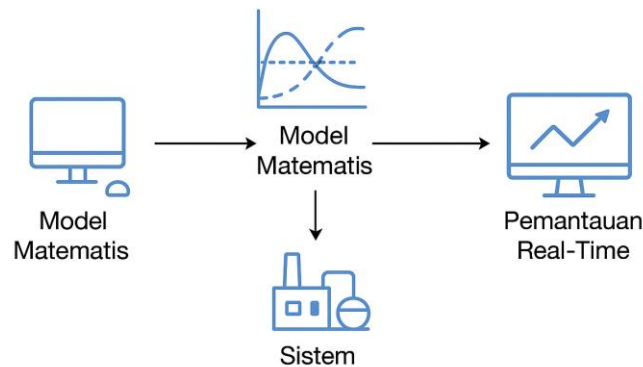


Sumber: Kumar & Singh (2023)

Gambar 1. Diagram Perbandingan Metode Analisis Stabilitas Lereng

Integrasi model matematis dengan sistem pemantauan real-time memungkinkan pembaruan parameter model secara kontinu. Pendekatan ini menggunakan sensor seperti piezometer, inclinometer, dan extensometer yang terhubung ke sistem data digital. Melalui proses pembaruan Bayesian (Bayesian updating), model dapat menyesuaikan prediksi faktor keamanan terhadap perubahan kondisi aktual di lapangan. Integrasi ini mendukung konsep infrastruktur cerdas (smart infrastructure) yang responsif terhadap dinamika lingkungan.

Integrasi Model Matematis dengan Sistem Pemantauan Real-Time



Sumber: Adaptasi dari Griffiths et al. (2023)

Gambar 2. Skema Integrasi Model Matematis dengan Sistem Pemantauan *Real-Time*

Perbandingan Metode Keseimbangan Batas

Analisis komparatif terhadap berbagai varian metode keseimbangan batas menunjukkan adanya karakteristik yang membedakan dan memengaruhi pemilihan metode untuk aplikasi tertentu. Metode Bishop yang disederhanakan memperlihatkan kinerja sangat baik untuk lereng homogen dengan bentuk bidang gelincir melingkar, dengan penyimpangan kurang dari 5% dibandingkan metode yang lebih teliti. Proses perhitungan mencapai hasil yang stabil dalam 3–5 kali iterasi untuk sebagian besar kasus, sehingga menjadi pilihan yang efisien untuk analisis rutin.

Untuk kondisi lereng berlapis dengan sifat tanah yang sangat bervariasi, metode Spencer menunjukkan tingkat ketelitian yang lebih tinggi karena mampu menggambarkan redistribusi tegangan antar lapisan secara lebih realistis. Perbedaan faktor keamanan antara metode Spencer dan metode yang disederhanakan dapat mencapai 10–15% pada lereng dengan tingkat heterogenitas yang tinggi. Metode Morgenstern-Price memberikan fleksibilitas maksimal dalam menyesuaikan gaya antar irisan yang kompleks, namun memerlukan waktu komputasi yang lebih besar.

Analisis sensitivitas memperlihatkan bahwa perbedaan hasil antar metode meningkat seiring dengan bertambahnya kompleksitas geometri lereng dan variasi sifat material. Pada lereng dengan sudut kemiringan lebih dari 45 derajat atau rasio tinggi terhadap panjang yang besar, perbedaan prediksi faktor keamanan antar metode dapat menjadi cukup signifikan. Dalam kondisi seperti itu disarankan untuk menggunakan metode yang memenuhi kondisi keseimbangan secara lebih lengkap guna menjamin keandalan hasil analisis.

Penerapan analisis probabilistik dalam kerangka metode keseimbangan batas memberikan pandangan yang lebih menyeluruh mengenai ketidakpastian dalam prediksi stabilitas. Distribusi statistik parameter geoteknik, khususnya nilai kohesi dan sudut geser dalam, memiliki pengaruh dominan terhadap sebaran probabilitas faktor keamanan. Analisis Monte Carlo dengan 10.000 kali simulasi menunjukkan bahwa koefisien variasi faktor keamanan berkisar antara 15–25%, dengan pengaruh terbesar berasal dari variasi kohesi tanah.

Aplikasi Analisis Elemen Hingga

Penerapan analisis elemen hingga dalam kajian stabilitas lereng pada proyek infrastruktur perkotaan memberikan pemahaman yang tidak dapat diperoleh melalui metode kesetimbangan batas. Distribusi tegangan dan regangan di dalam massa tanah dapat divisualisasikan, sehingga memungkinkan identifikasi zona dengan mobilisasi kekuatan tinggi atau potensi terjadinya kegagalan progresif. Analisis deformasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum tidak selalu terjadi pada puncak lereng, tetapi dapat muncul di bagian tengah lereng tergantung pada konfigurasi stratigrafi dan sifat tanah.

Teknik reduksi kekuatan (*strength reduction*) dalam analisis elemen hingga menghasilkan faktor keamanan yang umumnya lebih rendah sekitar 5–10% dibandingkan dengan metode kesetimbangan batas konvensional untuk geometri lereng yang sama. Perbedaan ini disebabkan oleh kemampuan analisis elemen hingga dalam menangkap mekanisme kegagalan yang lebih kompleks dan realistis, termasuk kegagalan progresif serta perilaku pelunakan regangan (*strain softening*). Pada lereng dengan material yang memiliki sifat pelunakan regangan yang kuat, perbedaan tersebut dapat menjadi lebih signifikan.

Analisis tahap konstruksi (*staged construction*) menggunakan metode elemen hingga juga mengungkapkan perubahan faktor keamanan selama proses pembangunan infrastruktur. Pekerjaan galian untuk pembangunan jalan atau struktur dapat menyebabkan penurunan sementara faktor keamanan sebesar 20–30%, yang kemudian dapat pulih melalui penerapan sistem perkuatan. Urutan pelaksanaan konstruksi dan waktu pemasangan perkuatan menjadi faktor kritis yang dapat dioptimalkan melalui simulasi numerik.

Pemodelan interaksi antara struktur perkuatan dan tanah memerlukan perhatian terhadap karakterisasi bidang kontak (*interface*). Sifat-sifat bidang kontak, seperti sudut geser dan adhesi, memiliki pengaruh yang besar terhadap efektivitas sistem perkuatan. Analisis parametrik menunjukkan bahwa pengurangan sebesar 30% pada sudut geser bidang kontak dapat menurunkan kontribusi perkuatan terhadap faktor keamanan hingga 15–20%. Karakterisasi bidang kontak yang akurat melalui pengujian atau analisis balik menjadi syarat penting untuk menghasilkan prediksi yang andal.

Analisis Multi-Fase dan Coupling Effects

Inkorporasi analisis keterpaduan (*coupled analysis*) dalam evaluasi stabilitas lereng mengungkapkan kompleksitas yang tidak dapat dijelaskan sepenuhnya melalui analisis kondisi terdrainase (*drained*) konvensional. Analisis konsolidasi terpadu menunjukkan bahwa disipasi tekanan air pori berlebih setelah proses konstruksi dapat menyebabkan perubahan sementara terhadap faktor keamanan. Pada tanah kohesif dengan permeabilitas rendah, periode konsolidasi dapat berlangsung hingga beberapa tahun, di mana kondisi stabilitas akan terus mengalami perubahan secara bertahap.

Pengaruh air tanah terhadap stabilitas lereng tidak hanya terbatas pada kontribusinya terhadap gaya penggerak melalui tekanan pori, tetapi juga memengaruhi distribusi dan besarnya gaya rembesan (*seepage forces*). Analisis rembesan keadaan tunak (*steady-state seepage*) yang dipadukan dengan penilaian stabilitas menunjukkan bahwa konfigurasi muka air tanah memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap faktor keamanan. Variasi muka air tanah secara musiman dapat menyebabkan fluktuasi faktor keamanan dalam kisaran 25–35%, dengan nilai minimum biasanya terjadi pada puncak musim hujan.

Untuk lereng yang berada di dekat infrastruktur transportasi dan mengalami beban berulang (*cyclic loading*), analisis stabilitas dinamis menjadi sangat penting. Respons percepatan dari material lereng terhadap getaran dapat meningkat (amplifikasi), tergantung pada frekuensi alami dan karakteristik redaman tanah. Analisis semu-statis (*pseudo-static*) yang sering digunakan dalam praktik dapat memberikan hasil yang terlalu rendah atau terlalu tinggi terhadap stabilitas seismik, tergantung pada pemilihan koefisien percepatan yang digunakan. Analisis riwayat waktu (*time-history analysis*) dengan metode beda hingga memberikan penilaian yang lebih akurat, meskipun memerlukan definisi gerakan input yang representatif.

Pengaruh termal terhadap stabilitas lereng menjadi pertimbangan yang semakin penting, terutama di wilayah yang mengalami siklus pembekuan dan pencairan musiman atau pada infrastruktur yang menghasilkan panas. Siklus beku-cair dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik tanah melalui pembentukan retakan mikro dan gangguan struktur tanah. Analisis keterpaduan termo-hidro-mekanik

menunjukkan bahwa variasi temperatur dapat memodifikasi rezim tekanan pori dan pada akhirnya memengaruhi distribusi tegangan efektif serta kondisi stabilitas lereng.

Optimasi Desain Perkuatan Lereng

Penerapan model matematis dalam optimasi desain sistem perkuatan lereng memungkinkan pencapaian tujuan ganda yang mencakup kinerja teknis, efisiensi ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan. Analisis parametrik yang sistematis terhadap konfigurasi perkuatan membantu mengidentifikasi kombinasi parameter optimal seperti jarak antar elemen (*spacing*), panjang (*length*), dan sudut kemiringan (*inclination*) untuk berbagai sistem seperti *soil nailing*, dinding jangkar (*anchored walls*), serta tanah yang diperkuat (*reinforced earth*).

Untuk sistem *soil nailing*, hasil analisis menunjukkan bahwa pengurangan jarak antar paku tanah dari 2,0 meter menjadi 1,5 meter dapat meningkatkan faktor keamanan sebesar 12–15%, meskipun diikuti dengan peningkatan biaya yang juga cukup signifikan. Optimasi dengan pendekatan multi-objektif menggunakan algoritma genetika atau *particle swarm optimization* mampu mengidentifikasi solusi *Pareto-optimal* yang menyeimbangkan antara kinerja dan biaya. Penerapan pendekatan optimasi ini dapat menghasilkan penghematan biaya sebesar 15–20% dibandingkan dengan desain konvensional yang konservatif, tanpa mengurangi bahkan dapat meningkatkan margin keamanan.

Analisis berbasis keandalan (*reliability-based design*) menawarkan kerangka kerja yang rasional untuk mengkalibrasi faktor keamanan target dan menentukan dimensi sistem perkuatan. Dengan menetapkan indeks keandalan target, misalnya $\beta = 3,0$ yang setara dengan probabilitas kegagalan sekitar 0,13%, dimensi perkuatan dapat ditentukan untuk mencapai tingkat keandalan yang konsisten. Pendekatan ini lebih ketat dibandingkan penerapan faktor keamanan umum yang sama untuk semua kondisi, serta dapat menghasilkan desain yang lebih seimbang dalam hal tingkat risiko yang sebenarnya.

Pertimbangan aspek keberlanjutan dalam pemilihan dan perancangan perkuatan lereng semakin menonjol. *Life cycle assessment* terhadap berbagai alternatif sistem perkuatan menunjukkan bahwa kandungan karbon dan dampak lingkungannya dapat sangat bervariasi. Solusi berbasis alam seperti perkuatan dengan vegetasi atau sistem tanah yang distabilisasi secara mekanis menggunakan geosintetik dapat memberikan jejak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan struktur beton konvensional, meskipun memiliki potensi kompromi terhadap ketahanan jangka panjang atau keterterapan pada kondisi yang lebih ekstrem.

Integrasi dengan Sistem Monitoring dan Manajemen Risiko

Integrasi data pemantauan secara *real-time* dengan model prediktif kestabilan merupakan perubahan paradigma dalam manajemen risiko lereng untuk infrastruktur perkotaan. Instrumen seperti inklinometer, piezometer, dan ekstensometer menyediakan data kontinu maupun periodik mengenai perilaku aktual lereng, yang dapat dibandingkan dengan prediksi model untuk tujuan validasi atau pembaruan parameter. Perbedaan antara perilaku yang diprediksi dan yang teramati dapat mengindikasikan perlunya kalibrasi ulang model atau revisi asumsi desain.

Penerapan kerangka *Bayesian updating* memfasilitasi integrasi data pemantauan secara sistematis untuk penyempurnaan parameter model dan pengurangan ketidakpastian. Dengan akumulasi data pemantauan dari waktu ke waktu, distribusi parameter posterior menjadi semakin sempit, sehingga meningkatkan tingkat kepercayaan terhadap hasil prediksi. Pendekatan ini sangat bermanfaat selama tahap konstruksi atau pada awal masa operasional, di mana metode observasional dapat menjadi panduan dalam pengambilan keputusan adaptif.

Sistem peringatan dini berbasis ambang batas deformasi atau tekanan pori dapat diintegrasikan dengan model kestabilan untuk menilai kondisi keamanan secara *real-time*. Penetapan ambang batas dapat didasarkan pada analisis balik terhadap kondisi kritis atau analisis ke depan terhadap skenario kegagalan. Sistem ambang bertingkat dengan zona hijau–kuning–merah memberikan protokol respons bertahap yang menyeimbangkan antara potensi peringatan palsu dan risiko tidak terdeteksinya ancaman sebenarnya.

Teknologi *digital twin* merepresentasikan terobosan dalam integrasi antara pemantauan dan pemodelan aset infrastruktur. Replika digital dari lereng fisik yang diperbarui secara berkelanjutan dengan data pemantauan memungkinkan simulasi berbagai skenario serta penilaian dampak dari intervensi atau perubahan kondisi. Strategi pemeliharaan prediktif dapat dikembangkan berdasarkan

proyeksi kondisi masa depan, sehingga berpotensi memperpanjang umur layanan dan mengurangi biaya siklus hidup melalui manajemen yang proaktif, bukan reaktif.

Tantangan Implementasi dan Rekomendasi Praktis

Implementasi model matematis yang canggih dalam praktik rekayasa menghadapi berbagai tantangan yang mencakup aspek teknis, sumber daya, dan kelembagaan. Kebutuhan akan keahlian khusus dalam pemodelan numerik dan geoteknik komputasional dapat menjadi hambatan, terutama bagi perusahaan konsultan kecil atau proyek dengan anggaran terbatas. Pengembangan kapasitas melalui pelatihan dan transfer pengetahuan menjadi hal yang krusial untuk memperluas penerapan teknik analisis tingkat lanjut.

Kualitas dan ketersediaan data geoteknik merupakan prasyarat fundamental untuk menghasilkan pemodelan yang andal, namun sering kali menjadi faktor pembatas dalam praktik. Variabilitas spasial sifat tanah dan keterbatasan investigasi lapangan dapat menimbulkan ketidakpastian yang signifikan pada parameter masukan. Penerapan pendekatan investigasi bertahap yang menggabungkan survei awal dengan penyelidikan rinci yang ditargetkan berdasarkan analisis pendahuluan dapat mengoptimalkan alokasi sumber daya dan mengurangi ketidakpastian secara keseluruhan.

Sumber daya komputasi dan biaya lisensi perangkat lunak dapat menjadi pertimbangan penting, khususnya untuk analisis yang memerlukan pemodelan berfidelitas tinggi atau studi parametrik yang luas. Komputasi berbasis cloud dan platform perangkat lunak sumber terbuka menawarkan alternatif yang dapat mengurangi hambatan biaya, meskipun terdapat potensi kompromi pada antarmuka pengguna, dukungan teknis, atau validasi implementasi. Penilaian manfaat dan biaya perlu dilakukan untuk menentukan tingkat kecanggihan analisis yang sesuai dengan kebutuhan spesifik suatu proyek.

Validasi hasil model terhadap kinerja lapangan atau studi kasus menjadi langkah penting untuk membangun kepercayaan terhadap hasil prediksi. Pembandingan dengan studi kasus yang terdokumentasi dengan baik memungkinkan penilaian terhadap keandalan berbagai pendekatan pemodelan serta identifikasi bias sistematis. Pengembangan basis data lokal mengenai kinerja infrastruktur lereng dapat memfasilitasi kalibrasi model terhadap kondisi geologi regional serta mendukung pengembangan korelasi empiris yang melengkapi analisis lanjutan.

Kerangka regulasi dan kriteria penerimaan untuk penerapan metode numerik lanjutan dalam perancangan masih perlu dikembangkan atau diperjelas di banyak yurisdiksi. Pembentukan pedoman yang memuat persyaratan minimum untuk pemodelan, standar dokumentasi, dan proses penelaahan sejawat dapat memfasilitasi penerimaan yang lebih luas sekaligus menjaga kendali mutu yang memadai. Kolaborasi antara kalangan akademisi, industri, dan lembaga regulasi sangat penting untuk membangun praktik yang disepakati bersama.

Perspektif Keberlanjutan dan Resiliensi

Integrasi pertimbangan keberlanjutan dalam perancangan dan analisis stabilitas lereng untuk infrastruktur perkotaan merepresentasikan evolusi menuju pendekatan holistik yang mempertimbangkan dimensi lingkungan, sosial, dan ekonomi. Pemilihan material serta teknik konstruksi dapat dioptimalkan tidak hanya untuk meningkatkan kinerja struktural, tetapi juga untuk meminimalkan jejak karbon dan gangguan terhadap lingkungan. Kerangka penilaian daur hidup (*life cycle assessment*) memfasilitasi perbandingan kuantitatif antaralternatif serta membantu dalam mengidentifikasi solusi yang paling optimal dari perspektif keberlanjutan.

Solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) untuk stabilisasi lereng, seperti penguatan dengan vegetasi dan teknik rekayasa bio tanah (*soil bioengineering*), menawarkan keunggulan dari sisi keberlanjutan, namun memerlukan pendekatan pemodelan yang berbeda dibandingkan sistem struktural konvensional. Kontribusi mekanis vegetasi terhadap stabilitas lereng melalui penguatan akar dapat diukur menggunakan model yang mengintegrasikan arsitektur dan kekuatan akar. Manfaat hidrologis dari vegetasi, seperti pengurangan infiltrasi dan peningkatan evapotranspirasi, juga berperan dalam menjaga stabilitas, meskipun menambah kompleksitas dalam analisis yang melibatkan keterpaduan beberapa faktor.

Dampak perubahan iklim terhadap kondisi stabilitas lereng menjadi pertimbangan yang semakin penting dalam perencanaan infrastruktur. Perubahan pola curah hujan, suhu, serta frekuensi kejadian ekstrem yang diproyeksikan dapat memengaruhi kondisi air tanah, tingkat pelapukan, dan skenario pembebanan. Integrasi skenario iklim dalam penilaian stabilitas jangka panjang memungkinkan

evaluasi ketahanan infrastruktur serta identifikasi langkah adaptasi yang diperlukan untuk mempertahankan kinerja yang dapat diterima di masa depan.

Prinsip ekonomi sirkular dapat diterapkan dalam proyek stabilisasi lereng melalui pemanfaatan material daur ulang atau hasil sampingan industri sebagai material timbunan maupun penguat. Karakterisasi sifat-sifat rekayasa dari material nonkonvensional serta pengembangan model konstitutif yang sesuai diperlukan untuk memprediksi kinerja secara andal. Material inovatif seperti geopolimer atau geosintetik berbasis plastik daur ulang menawarkan potensi manfaat keberlanjutan, namun tetap memerlukan validasi terhadap ketahanan jangka panjang dan kesesuaian lingkungan.

Arah Pengembangan Masa Depan

Kemajuan kemampuan komputasi dan teknologi sensor membuka peluang baru dalam analisis dan pengelolaan kestabilan lereng. Teknik pembelajaran mesin (*machine learning*) semakin banyak diterapkan untuk mengenali pola dalam data pemantauan, memprediksi tanda-tanda awal kegagalan, serta membuat model pengganti (*surrogate modeling*) untuk analisis yang memerlukan komputasi tinggi. Integrasi antara model berbasis fisika dengan pendekatan berbasis data dapat memadukan keunggulan masing-masing untuk meningkatkan kemampuan prediksi.

Teknologi Internet of Things (IoT) dan jaringan sensor nirkabel memfasilitasi penerapan jaringan instrumen yang padat dengan biaya serta kompleksitas instalasi yang lebih rendah. Pengaliran data secara real-time memungkinkan penilaian kondisi secara berkelanjutan dan respons cepat terhadap potensi bahaya yang muncul. Integrasi dengan platform Building Information Modeling (BIM) untuk proyek infrastruktur juga dapat meningkatkan koordinasi antara tim perancang geoteknik dan struktur.

Pengembangan metode probabilistik dan reliabilitas yang lebih mudah diakses oleh para insinyur praktisi merupakan bidang penting untuk penelitian dan pengembangan berkelanjutan. Perangkat lunak yang ramah pengguna dan menggabungkan analisis statistik canggih dalam antarmuka yang intuitif dapat memperluas akses terhadap teknik-teknik mutakhir. Selain itu, pengembangan metode reliabilitas yang disederhanakan namun tetap seimbang antara akurasi dan efisiensi komputasi dapat memperluas penerapannya pada proyek-proyek rutin.

Standarisasi dan harmonisasi praktik pemodelan di berbagai yurisdiksi dapat memfasilitasi transfer pengetahuan serta mendukung pengembangan praktik terbaik. Kolaborasi internasional dalam pengembangan tolok ukur, basis data validasi, dan pedoman teknis dapat mempercepat kemajuan di bidang ini sekaligus mempertahankan relevansi terhadap kondisi geologis dan iklim yang spesifik di setiap wilayah.

KESIMPULAN

Model matematis memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan akurasi prediksi stabilitas lereng. Metode kesetimbangan batas tetap relevan untuk analisis dasar, sementara analisis elemen hingga lebih sesuai untuk kondisi kompleks dengan interaksi tanah-struktur. Integrasi data real-time memperkuat keandalan prediksi dan mendukung pengambilan keputusan adaptif. Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada pengembangan sistem terintegrasi berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk meningkatkan efisiensi analisis serta mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan tangguh.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, F., Tang, X., Qiu, J., Gurung, P., dan Khan, S. (2021). Probabilistic slope stability analysis using Bayesian approach and its application in infrastructure planning. *Engineering Geology*, 285, 106067. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106067>.
- Alfahrizi, D., & Alauddin, M. H. (2024). Pelanggaran Pemanfaatan Ruang dan Risiko Longsor di Simpang Jalan Kawasan Stasiun Batutulis Bogor. *LITRA: Jurnal Hukum Lingkungan, Tata Ruang, dan Agraria*, 4(1). <https://doi.org/10.23920/litra.v4i1.2289>.
- Araújo, E. R., Córdão Neto, M. P., dan Cavalcante, A. L. (2022). Three-dimensional finite element analysis of slope stability under rainfall infiltration conditions. *Soils and Foundations*, 62(3), 101145. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101145>.
- Arif, M. Z., Zahroh, M., & Rizka, S. A. (2025). Numerical Solution of Anisotropic Diffusion with Localized Source Using Euler Scheme and Finite Element Method. *Berkala Sainstek*, 13(2), 119-130. <https://doi.org/10.19184/bst.v13i2.53711>.

- Bai, T., Huang, X., dan Li, C. (2023). Integration of machine learning and numerical modeling for prediction of slope stability in urban areas. *Computers and Geotechnics*, 156, 105289. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105289>.
- Chen, H., Lee, C. F., dan Law, K. T. (2021). Advanced numerical analysis of rainfall-induced slope failures in tropical regions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(8), 04021068. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002573).
- Deng, D., Li, L., dan Zhao, L. (2022). Comparative study of limit equilibrium and finite element methods for slope stability analysis in complex geological conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(4), 158. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02665-0>.
- Edinov, S., Rancak, G. T., Wahyudi, R., Wiyani, L., & Prabasari, I. G. (2023). Carbon Capture and Storage dan Circular Economy: Tinjauan Sistematis dan Arah Penelitian di Masa Depan. *Nusantara Technology and Engineering Review*, 1(1), 19-30. <https://doi.org/10.55732/nter.v1i1.1109>.
- Firdaus, H. (2025). Pengembangan Algoritma Numerik yang Efisien untuk Menyelesaikan Persamaan Diferensial Parsial dalam Simulasi Matematika Modern. *Mandalika: Jurnal Ilmu Pendidikan dan Bahasa*, 3(2), 85-96. <https://doi.org/10.59613/jipb.v3i1.289>.
- Griffiths, D. V., Huang, J., dan Fenton, G. A. (2023). Probabilistic slope stability analysis by finite elements with random fields. *Géotechnique*, 73(2), 126-139. <https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00180>.
- Heston, Y. P. (2015). *Perubahan Iklim di Perkotaan*. Yogyakarta: Diandracreative.
- Huang, F., Chen, J., Liu, W., Huang, J., Hong, H., dan Chen, W. (2022). Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and precipitation. *Geosciences*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010016>.
- Jamalinia, E., Vardon, P. J., dan Steele-Dunne, S. C. (2021). The impact of evaporation induced cracks and precipitation on temporal slope stability. *Computers and Geotechnics*, 130, 103941. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103941>.
- Kumar, V., dan Singh, T. N. (2023). Comparative assessment of different slope stability analysis methods for infrastructure development in mountainous terrain. *Natural Hazards*, 116(1), 567-589. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05691-x>.
- Li, X., Zhang, L., dan Jiang, S. (2021). Updating performance of high rock slopes by Bayesian inference of monitoring data. *Engineering Geology*, 289, 106185. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106185>.
- Liu, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Xu, Q., dan Li, W. (2022). Risk assessment and management of excavation slopes in urban areas using numerical modeling approach. *Safety Science*, 151, 105734. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105734>.
- Macrotrends. (2025). "Indonesia Urban Population", tersedia di <https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/idn/indonesia/urban-population>, diakses pada 12 November 2025.
- Medtry, M. (2021). Kajian Pengembangan Kawasan Campuran (Mixed Use) di Perkotaan. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 5(1), 1-10. <https://doi.org/10.31543/jii.v5i1.171>.
- Misnawati, M., & Lianto, W. (2025). Perancangan Konstruksi Penahan Longsoran Dengan Menggunakan Alternatif Konstruksi Geotextile Wall. *Knowledge: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan*, 5(2), 493-503. <https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i2.5780>.
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., dan Watts, B. D. (2021). Tailings dam management for the 21st century: perspectives on governance, safety, and sustainability. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(10), 1389-1415. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0537>.
- Pham, K., Kim, D., Choi, H. J., Lee, I. M., dan Choi, H. (2021). A novel hybrid soft computing model using random forest and particle swarm optimization for estimation of undrained shear strength of soil. *Sustainability*, 13(4), 2218. <https://doi.org/10.3390/su13042218>.
- Qian, Z., Zou, Z., Tian, H., Zhang, Z., dan Feng, K. (2023). Three-dimensional stability analysis of slope reinforced with multi-row stabilizing piles using finite element method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(4), 892-906. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.015>.
- Rahardjo, H., Krisnanto, S., dan Leong, E. C. (2022). Effectiveness of horizontal drains for slope stability. *Engineering Geology*, 298, 106541. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106541>.

- Ridwan, M., Suhar, A. M., Ulum, B., & Muhammad, F. (2021). Pentingnya penerapan literature review pada penelitian ilmiah. *Jurnal Masohi*, 2(1), 42-51. <https://doi.org/10.36339/jmas.v2i1.427>.
- Shen, H., Klapperich, H., Abbas, S. M., dan Ibrahim, A. (2021). Slope stability analysis based on the Explicit Smoothed Particle Finite Element Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 128, 14-29. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.03.018>.
- Silalahi, F. E. S., Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide Susceptibility Assessment Using Frequency Ratio Model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>.
- Tang, H., Wasowski, J., dan Juang, C. H. (2023). Geohazards in naturally fractured rock: effects of fracture geometry on progressive failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(1), 45-68. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03079-z>.
- Tradingeconomics. (2025). "Indonesia - Urban Population (% Of Total)", tersedia di <https://tradingeconomics.com/indonesia/urban-population-percent-of-total-wb-data.html>, diakses pada 12 November 2025.
- Tschuchnigg, F., Schweiger, H. F., dan Sloan, S. W. (2021). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. *Computers and Geotechnics*, 134, 104096. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104096>.
- Wang, L., Wu, C., Tang, L., Zhang, W., Lacasse, S., Liu, H., dan Gao, L. (2022). Efficient reliability analysis of earth dam slope stability using extreme gradient boosting method. *Acta Geotechnica*, 17(11), 5025-5043. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01638-5>.
- Worldometer. (2025). "Indonesia Population (Live)", tersedia di <https://www.worldometers.info/world-population/indonesia-population/>, diakses pada 12 November 2025.
- Wu, L., Zhou, Y., Sun, P., Shi, J., Liu, G., dan Bai, L. (2023). Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure. *Catena*, 222, 106858. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106858>.
- Yulianti, Serli (2023) Analisis Efektivitas Konfigurasi Sisir Sheet Pile Menggunakan Metode Finite Element 3 Dimensi Pada Kasus Long Storage Kota Jakarta. *Skripsi*, Universitas Komputer Indonesia.
- Zagoto, S. M., & Khoiriyah, S. N. (2022). Studi Prioritas Kerawanan Longsor Dan Penanganan Lereng Jalan Kota Semarang, *Tugas Akhir*, Universitas Islam Sultan Agung.
- Zhang, Y., Hu, X., Tannant, D. D., Zhang, G., dan Tan, F. (2022). Field monitoring and deformation characteristics of a landslide with piles in the Three Gorges Reservoir area. *Landslides*, 19(3), 581-594. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01827-6>.
- Zhou, C., Hu, Y., Xiao, T., Ou, Q., dan Wang, L. (2023). Analytical model for reinforcement effect and load transfer of pre-stressed anchor cable with bore deviation. *Construction and Building Materials*, 379, 131219. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131219>.
- Zhu, H., Zhang, L. M., Zhang, L. L., dan Zhou, C. B. (2021). Two-dimensional probabilistic infiltration analysis with a spatially varying permeability function. *Computers and Geotechnics*, 133, 103991. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.103991>.
- Zou, X., Hu, X., Zhou, L., Shen, C., dan Wang, S. (2021). Feasibility analysis and application of nano-silica modified spent fluid mixture for ground stabilization. *Journal of Environmental Management*, 298, 113494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113494>.