



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 206-218
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Evaluasi Kinerja Penanggulangan Kelongsoran Lereng pada Timbunan Tinggi Menggunakan Bronjong Berbasis Analisis Plaxis V24.3.0: Studi Kasus Candisari, Kota Semarang

Nazala Trisnadyani^{1*}, Nur Mukti Afiatillah², Lisa Fitriyana³

¹⁻³ Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

email: trisnadyaninazala@gmail.com¹, nurmukti224@gmail.com²

Article Info :

Received:
20-04-2026
Revised:
03-05-2026
Accepted:
13-05-2026

Abstract

This study evaluates the performance of gabion reinforcement in mitigating slope failure on a high embankment slope in Candisari, Semarang City, using finite element analysis based on PLAXIS V24.3.0. The research integrates field observations, laboratory geotechnical testing, and numerical simulation to investigate slope deformation behavior, safety factor characteristics, and hydro mechanical responses under varying groundwater conditions. The numerical model was developed using plane strain analysis with staged construction procedures and strength reduction factor methods to represent actual field conditions. The results indicate that the unreinforced slope experienced significant deformation and a critical safety factor associated with progressive failure mechanisms. The installation of gabion structures improved slope stability by reducing horizontal and vertical displacement, redistributing effective stress, and shifting the slip surface away from the critical zone. Variations in groundwater level significantly affected slope performance through increased pore water pressure and reduced effective stress conditions. The study confirms that gabion reinforcement provides effective structural resistance for high embankment slopes, although hydraulic sensitivity remains a controlling factor in long term stability performance.

Keywords: Gabion Reinforcement, Slope Stability, Finite Element Analysis, Groundwater Variation, PLAXIS V24.3.0.

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kinerja penguatan gabion dalam memitigasi kegagalan lereng pada lereng tanggul tinggi di Candisari, Kota Semarang, dengan menggunakan analisis elemen hingga berbasis PLAXIS V24.3.0. Penelitian ini mengintegrasikan pengamatan lapangan, pengujian geoteknik laboratorium, dan simulasi numerik untuk menyelidiki perilaku deformasi lereng, karakteristik faktor keamanan, serta respons hidromekanis di bawah kondisi air tanah yang bervariasi. Model numerik dikembangkan menggunakan analisis regangan datar dengan prosedur konstruksi bertahap dan metode faktor pengurangan kekuatan untuk merepresentasikan kondisi lapangan yang sebenarnya. Hasil menunjukkan bahwa lereng tanpa penguatan mengalami deformasi signifikan dan faktor keamanan kritis yang terkait dengan mekanisme kegagalan progresif. Pemasangan struktur gabion meningkatkan stabilitas lereng dengan mengurangi perpindahan horizontal dan vertikal, mendistribusikan ulang tegangan efektif, serta memindahkan permukaan geser menjauh dari zona kritis. Variasi tingkat air tanah secara signifikan memengaruhi kinerja lereng melalui peningkatan tekanan air pori dan kondisi tegangan efektif yang berkurang. Studi ini menegaskan bahwa penguatan gabion memberikan resistansi struktural yang efektif untuk lereng timbunan tinggi, meskipun sensitivitas hidraulik tetap menjadi faktor penentu dalam kinerja stabilitas jangka panjang.

Kata kunci: Penguatan Gabion, Stabilitas Lereng, Analisis Elemen Hingga, Variasi Air Tanah, PLAXIS V24.3.



©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

Stabilitas lereng pada kawasan urban dengan morfologi bergelombang hingga curam telah berkembang menjadi isu strategis dalam rekayasa geoteknik global seiring meningkatnya intensitas pembangunan infrastruktur pada daerah dengan keterbatasan ruang horizontal, perubahan tata guna lahan, serta eskalasi kejadian hidrometeorologi ekstrem yang memperbesar risiko kegagalan lereng pada timbunan tinggi maupun lereng hasil pemotongan tanah. Literatur geoteknik kontemporer menunjukkan bahwa kegagalan lereng tidak lagi dipahami semata sebagai persoalan mekanika tanah konvensional, melainkan sebagai interaksi kompleks antara karakteristik material tanah, perubahan

tekanan air pori, sistem drainase, beban tambahan konstruksi, dan respons deformasi nonlinier yang memerlukan pendekatan numerik berbasis elemen hingga untuk memperoleh representasi perilaku tanah yang lebih realistis (Terzaghi et al., 1996; Das, 2010; Hardiyatmo, 2014). Dalam konteks tersebut, penggunaan perangkat lunak PLAXIS berkembang pesat sebagai instrumen analisis deformasi dan stabilitas lereng karena mampu mengintegrasikan pemodelan tegangan-regangan, kondisi batas hidraulik, serta tahapan konstruksi secara simultan, sehingga memberikan akurasi interpretasi yang lebih tinggi dibanding pendekatan limit equilibrium konvensional, khususnya pada kasus timbunan tinggi yang mengalami pengaruh fluktuasi muka air tanah dan ketidakseragaman karakteristik geoteknik. Fenomena ini menjadi semakin relevan pada kawasan perkotaan tropis seperti Kota Semarang yang memiliki karakteristik curah hujan tinggi, perkembangan kawasan terbangun yang masif, serta dominasi zona gerakan tanah menengah hingga tinggi yang meningkatkan probabilitas terjadinya deformasi progresif dan kelongsoran lereng pada area timbunan buatan.

Penelitian terdahulu memperlihatkan bahwa analisis kestabilan lereng berbasis numerik telah menghasilkan berbagai temuan penting mengenai mekanisme keruntuhan dan efektivitas metode perkuatan lereng, meskipun hasil yang diperoleh masih menunjukkan variasi interpretasi yang signifikan bergantung pada parameter tanah, kondisi hidrologi, serta model perkuatan yang digunakan. Suhaimah et al. (2025) menunjukkan bahwa metode elemen hingga mampu mengidentifikasi bidang gelincir kritis dan distribusi deformasi secara lebih rinci dibanding analisis konvensional pada kasus kelongsoran JLS LOT 3, sementara Wahab et al. (2023) menegaskan bahwa pemodelan numerikal pada lereng batulempung dapat merepresentasikan pengaruh perubahan tegangan efektif akibat infiltrasi air terhadap penurunan faktor keamanan lereng secara progresif. Pada sisi lain, Syah dan Mulyasari (2022) memperlihatkan bahwa mitigasi longsor tidak hanya dipengaruhi oleh geometri lereng, tetapi juga oleh efektivitas sistem pengendalian air permukaan dan drainase internal yang menentukan stabilitas jangka panjang lereng pada daerah rawan longsor perkotaan. Kajian mengenai bronjong sebagai sistem perkuatan gravitasi juga menunjukkan kecenderungan hasil positif dalam meningkatkan ketahanan lereng terhadap gaya lateral tanah karena struktur bronjong mampu mendistribusikan tekanan tanah secara lebih fleksibel serta mengurangi tekanan hidrostatis melalui sifat permeabel material penyusunnya (Wantoro, 2025). Perspektif tersebut konsisten dengan prinsip dasar mekanika tanah yang menyatakan bahwa peningkatan tekanan air pori akan menurunkan tegangan efektif tanah dan memperbesar potensi kelongsoran, sehingga sistem perkuatan yang mampu mengendalikan deformasi sekaligus mengurangi akumulasi tekanan air menjadi sangat penting dalam rekayasa stabilitas lereng (Terzaghi et al., 1996; Das, 2010).

Meskipun demikian, perkembangan literatur masih memperlihatkan adanya keterbatasan metodologis dan empiris yang cukup mendasar, terutama terkait minimnya integrasi antara evaluasi deformasi lereng, variasi muka air tanah, dan efektivitas struktur bronjong dalam satu kerangka analisis numerik yang komprehensif. Sebagian besar penelitian terdahulu cenderung berfokus pada perhitungan faktor keamanan sebagai indikator utama kestabilan lereng tanpa menginvestigasi respons displacement horizontal maupun vertikal secara mendalam, padahal deformasi merupakan parameter kritis dalam memahami perilaku progresif keruntuhan lereng pada timbunan tinggi. Kajian mengenai bronjong juga umumnya masih ditempatkan sebagai solusi struktural praktis tanpa pembahasan memadai mengenai interaksi antara massa bronjong, perubahan distribusi tegangan, serta pengaruh kenaikan muka air tanah terhadap perubahan bidang gelincir dan deformasi internal lereng. Pada saat yang sama, standar desain bronjong yang mengacu pada SNI 03-0090-1999 lebih banyak menekankan aspek geometrik dan spesifikasi material, sementara evaluasi numerik terhadap performa aktual bronjong dalam kondisi geoteknik kompleks masih relatif terbatas (Badan Standardisasi Nasional, 1999). Kesenjangan ini menyebabkan banyak studi belum mampu menjelaskan secara komprehensif bagaimana efektivitas bronjong berubah pada kondisi lereng jenuh atau semi-jenuh yang mengalami peningkatan tekanan air pori akibat curah hujan tinggi, khususnya pada kawasan urban dengan karakteristik timbunan heterogen dan sistem drainase yang buruk seperti yang banyak ditemukan di wilayah Semarang.

Keterbatasan tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang signifikan karena kegagalan dalam memahami hubungan antara perubahan muka air tanah, respons deformasi, dan kapasitas perkuatan bronjong dapat menghasilkan desain stabilisasi lereng yang tidak adaptif terhadap kondisi lapangan aktual. Pada kawasan Candisari, Kota Semarang, kondisi geologi dan hidrologi yang kompleks diperburuk oleh keberadaan timbunan tinggi dengan kualitas material tanah yang kurang baik serta kerusakan sistem drainase yang meningkatkan potensi akumulasi tekanan air pori selama periode

hujan intensif. Situasi ini menciptakan kondisi kritis di mana kestabilan lereng tidak hanya ditentukan oleh parameter kuat geser tanah, tetapi juga oleh kemampuan sistem perkuatan dalam mengontrol deformasi dan redistribusi tegangan selama perubahan kondisi hidraulik berlangsung. Dalam perspektif rekayasa geoteknik modern, pendekatan evaluasi yang hanya berorientasi pada nilai safety factor tidak lagi memadai untuk menjelaskan perilaku lereng secara menyeluruh, sebab lereng dengan nilai faktor keamanan tertentu tetap dapat mengalami displacement berlebih yang memicu deformasi progresif dan kerusakan struktural pada area sekitar. Literatur mekanika tanah klasik telah lama menegaskan bahwa perubahan kecil pada tekanan air pori mampu memicu penurunan tegangan efektif secara signifikan pada tanah kohesif maupun granular, sehingga analisis numerik yang mempertimbangkan coupling antara deformasi dan kondisi aliran air tanah menjadi kebutuhan fundamental dalam evaluasi kestabilan lereng modern (Terzaghi et al., 1996; Hardiyatmo, 2014; Das, 2010).

Dalam lanskap keilmuan tersebut, penelitian ini menempatkan diri pada irisan antara rekayasa stabilitas lereng, analisis numerik geoteknik, dan evaluasi performa struktur bronjong pada kondisi timbunan tinggi yang dipengaruhi fluktuasi muka air tanah. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya memisahkan evaluasi faktor keamanan dari analisis deformasi, studi ini mengembangkan pendekatan integratif berbasis PLAXIS V24.3.0 untuk mengevaluasi hubungan simultan antara displacement horizontal, displacement vertikal, perubahan bidang gelincir, serta safety factor pada beberapa kondisi hidraulik yang berbeda. Fokus penelitian pada kasus longsor di Candisari memberikan kontribusi empiris yang penting karena kawasan tersebut merepresentasikan tipologi lereng urban tropis dengan kombinasi faktor kerentanan berupa timbunan tinggi, curah hujan intensif, sistem drainase tidak optimal, dan karakteristik tanah lempung yang sensitif terhadap perubahan kadar air. Penggunaan parameter tanah hasil pengujian laboratorium serta penerapan dimensi bronjong sesuai standar nasional memungkinkan penelitian ini tidak hanya berorientasi pada simulasi teoritis, tetapi juga menghasilkan interpretasi teknis yang memiliki relevansi langsung terhadap praktik mitigasi longsor pada kondisi lapangan aktual.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja penanggulangan kelongsoran lereng pada timbunan tinggi menggunakan perkuatan bronjong berbasis analisis numerik PLAXIS V24.3.0 melalui kajian terhadap perubahan displacement horizontal, displacement vertikal, bidang gelincir, dan faktor keamanan pada berbagai kondisi muka air tanah. Penelitian ini juga diarahkan untuk membangun pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme interaksi antara tekanan air pori, deformasi lereng, dan efektivitas bronjong sebagai sistem penahan gravitasi pada lereng urban tropis. Kontribusi teoretis penelitian terletak pada penguatan kerangka analisis stabilitas lereng berbasis pendekatan deformasi dan tegangan efektif secara simultan, sedangkan kontribusi metodologisnya diwujudkan melalui integrasi data laboratorium, pemodelan elemen hingga, dan evaluasi multi-skenario hidraulik dalam satu model analisis geoteknik yang adaptif terhadap kondisi lapangan kompleks.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis analisis numerik geoteknik yang mengintegrasikan data lapangan, pengujian laboratorium, dan pemodelan elemen hingga untuk mengevaluasi kinerja perkuatan bronjong pada lereng timbunan tinggi di kawasan Candisari, Kota Semarang, yang menurut Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (2019) termasuk dalam zona kerentanan gerakan tanah menengah hingga tinggi. Kerangka penelitian disusun melalui tahapan observasi geometri lereng eksisting, pengambilan sampel tanah pada kedalaman 0–3 m, serta pengujian laboratorium untuk memperoleh parameter geoteknik berupa berat isi jenuh dan tidak jenuh, kohesi efektif, sudut geser dalam, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan koefisien permeabilitas yang digunakan sebagai input model numerik. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak PLAXIS V24.3.0 berbasis finite element method dengan pendekatan plane strain untuk merepresentasikan perilaku tegangan-regangan tanah secara nonlinier pada kondisi aktual lereng. Geometri lereng dimodelkan sesuai dimensi lapangan dengan mempertimbangkan karakteristik timbunan dan sistem drainase eksisting, sedangkan struktur bronjong dimodelkan sebagai elemen penahan gravitasi menggunakan dimensi $2 \times 1 \times 1$ m dengan anyaman kawat 80×100 mm yang mengacu pada spesifikasi SNI 03-0090-1999. Tahapan implementasi model meliputi pembentukan mesh, penentuan initial stress condition, simulasi tahapan konstruksi, pemasangan bronjong, serta variasi kondisi muka air tanah pada elevasi $-5,00$ m dan $-1,00$ m dari permukaan lereng untuk merepresentasikan perubahan kondisi hidrologi akibat infiltrasi air hujan dan kenaikan tekanan air pori (Abramson et al., 2002).

Prosedur pengujian dilakukan melalui empat skenario simulasi, yaitu kondisi lereng tanpa perkuatan, lereng dengan perkuatan bronjong, lereng dengan perkuatan bronjong dan muka air tanah $-5,00$ m, serta lereng dengan perkuatan bronjong dan muka air tanah $-1,00$ m untuk mengevaluasi sensitivitas stabilitas lereng terhadap perubahan kondisi hidraulik. Validasi model dilakukan melalui evaluasi konsistensi respons deformasi dan pola bidang gelincir terhadap karakteristik longsor aktual di lokasi penelitian serta kesesuaian nilai faktor keamanan dengan kriteria stabilitas lereng dalam rekayasa geoteknik. Analisis numerik menggunakan metode strength reduction factor pada PLAXIS untuk menentukan safety factor kritis berdasarkan reduksi bertahap parameter kuat geser tanah hingga tercapai kondisi keruntuhan numerik. Metrik evaluasi kinerja yang digunakan meliputi displacement horizontal (U_x), displacement vertikal (U_y), distribusi tegangan efektif, perubahan bidang gelincir, dan nilai safety factor pada setiap kondisi simulasi untuk mengukur efektivitas bronjong dalam mengendalikan deformasi dan meningkatkan stabilitas lereng. Reprodusibilitas penelitian dijaga melalui penggunaan parameter material hasil pengujian laboratorium, tahapan simulasi yang terstruktur, konfigurasi geometri yang terukur, serta penerapan boundary condition dan hydraulic condition yang konsisten pada seluruh skenario analisis sehingga model numerik dapat direplikasi pada studi geoteknik dengan karakteristik lereng dan kondisi hidrologi serupa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

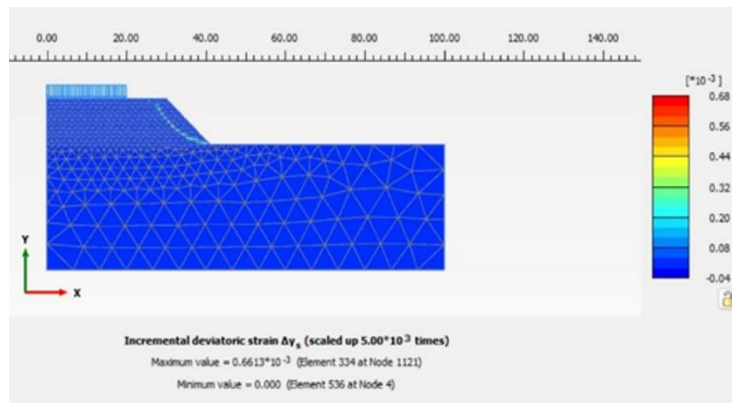
Analisis Stabilitas Lereng Eksisting Tanpa Perkuatan

Kondisi lereng eksisting pada kawasan timbunan tinggi Candisari menunjukkan karakteristik geoteknik yang rentan terhadap deformasi akibat kombinasi beban timbunan, infiltrasi air hujan, dan rendahnya kapasitas dukung tanah dasar. Analisis numerik menggunakan PLAXIS V24.3.0 memperlihatkan bahwa distribusi tegangan efektif terkonsentrasi pada kaki lereng dan berkembang menuju bidang gelincir potensial pada lapisan tanah lempung lunak. Pola deformasi horizontal memperlihatkan kecenderungan pergerakan lateral menuju area bebas lereng dengan intensitas yang meningkat pada zona transisi timbunan. Fenomena tersebut konsisten dengan konsep ketidakstabilan lereng pada tanah kohesif yang dijelaskan oleh Terzaghi et al. (1996) dan Hardiyatmo (2014).

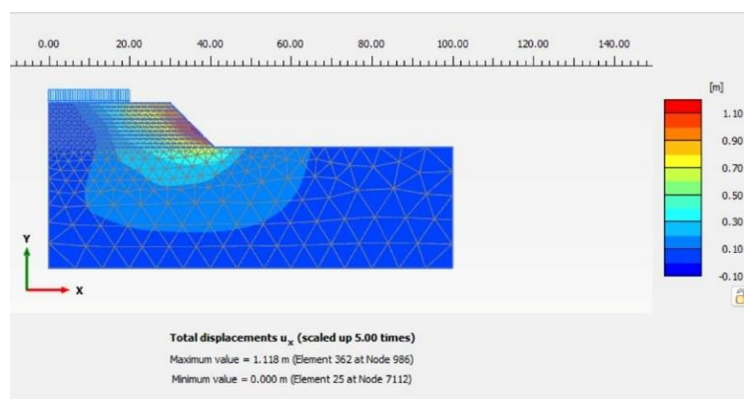
Respons deformasi numerik memperlihatkan bahwa displacement horizontal lebih dominan dibandingkan displacement vertikal akibat mekanisme translasi massa tanah pada bagian tengah lereng. Kondisi ini menunjukkan bahwa tekanan lateral tanah berkembang secara progresif seiring peningkatan tegangan geser internal pada lapisan timbunan. Analisis strength reduction factor menghasilkan nilai safety factor sebesar 1,174 yang menunjukkan kondisi lereng berada mendekati ambang kritis kestabilan. Nilai tersebut masih berada di bawah kriteria aman lereng permanen menurut Abramson et al. (2002).

Distribusi kontur deformasi menunjukkan konsentrasi displacement maksimum berada pada elevasi tengah lereng dengan arah deformasi menuju sisi luar lereng. Pola ini mengindikasikan terjadinya redistribusi tegangan akibat perbedaan kekakuan antara material timbunan dan tanah dasar eksisting. Perubahan regangan plastis pada area kaki lereng memperlihatkan awal perkembangan bidang gelincir melengkung yang berpotensi berkembang menjadi longsor rotasional. Karakteristik tersebut memiliki kesesuaian dengan hasil penelitian Wahab et al. (2023) mengenai deformasi progresif pada lereng tanah kohesif berbasis metode elemen hingga.

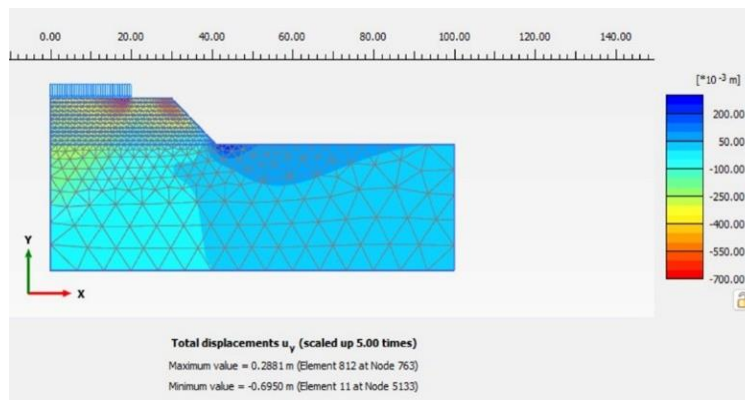
Interpretasi numerik menunjukkan bahwa kondisi drainase eksisting memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan tekanan air pori di dalam massa tanah. Akumulasi tekanan air pori menyebabkan penurunan tegangan efektif yang berimplikasi pada berkurangnya kuat geser tanah. Pola ini mempercepat perkembangan deformasi lateral pada bagian lereng dengan kemiringan tinggi. Mekanisme tersebut sejalan dengan kajian Syah dan Mulyasari (2022) yang menyatakan bahwa sistem drainase buruk menjadi salah satu pemicu dominan longsor pada wilayah perkotaan berbukit.



Gambar 1 Pola Bidang Gelincir Lereng Tanpa Perkuatan
Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.



Gambar 2 Distribusi Displacement Horizontal (U_x) Lereng Eksisting
Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.



Gambar 3. Distribusi Displacement Vertikal (U_y) Lereng Eksisting
Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.

Visualisasi numerik pada Gambar 1 menunjukkan bahwa bidang gelincir berkembang dari bagian tengah lereng menuju kaki lereng dengan bentuk rotasional yang relatif dalam. Pola tersebut memperlihatkan adanya konsentrasi regangan plastis pada zona tanah dengan nilai kohesi rendah. Distribusi displacement horizontal pada Gambar 2 menunjukkan deformasi lateral terbesar berada pada area tengah lereng akibat tekanan aktif tanah yang tidak tertahan. Sementara itu, distribusi displacement vertikal pada Gambar 3 memperlihatkan kecenderungan penurunan lokal pada zona timbunan yang mengalami redistribusi tegangan berlebih.

Hasil simulasi numerik memperlihatkan bahwa perilaku deformasi lereng dipengaruhi oleh interaksi antara modulus elastisitas tanah dan tekanan air pori dalam massa tanah. Nilai modulus elastisitas yang relatif rendah menyebabkan deformasi berkembang lebih cepat pada kondisi pembebanan bertahap. Karakteristik tersebut memperkuat asumsi bahwa tanah timbunan pada lokasi penelitian memiliki tingkat kompresibilitas yang cukup tinggi. Temuan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Kaliky et al. (2024) mengenai deformasi progresif pada timbunan dengan kondisi tanah lunak.

Tabel 1. Parameter Deformasi dan Stabilitas Lereng Tanpa Perkuatan

| Parameter Analisis | Nilai Hasil |
|---------------------------------------|-------------|
| Safety Factor | 1,174 |
| Displacement Horizontal Maksimum (Ux) | 0,214 m |
| Displacement Vertikal Maksimum (Uy) | 0,137 m |
| Kedalaman Bidang Gelincir Dominan | 3,85 m |
| Kondisi Lereng | Kritis |

Sumber: Hasil Analisis Numerik PLAXIS V24.3.0, 2026.

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa displacement horizontal maksimum lebih tinggi dibandingkan displacement vertikal sehingga mekanisme longsoran cenderung berkembang secara lateral. Nilai safety factor yang berada di bawah batas stabilitas optimum menunjukkan bahwa lereng memerlukan sistem perkuatan tambahan untuk menahan perkembangan deformasi. Kedalaman bidang gelincir dominan memperlihatkan bahwa zona kritis longsoran berkembang hingga mendekati lapisan tanah dasar lunak. Pola tersebut sesuai dengan teori mekanika tanah mengenai pengaruh tekanan aktif dan tegangan efektif terhadap stabilitas lereng yang dijelaskan oleh Das (2010).

Kondisi lereng tanpa perkuatan memperlihatkan bahwa redistribusi tegangan tidak mampu dikendalikan oleh struktur alami timbunan. Tegangan geser terkonsentrasi pada area kaki lereng dan menyebabkan perkembangan deformasi plastis yang signifikan. Situasi tersebut memperbesar risiko keruntuhan progresif apabila terjadi peningkatan infiltrasi air hujan dalam durasi panjang. Temuan ini mendukung hasil penelitian Ikhwan (2024) yang menunjukkan bahwa lereng tanpa sistem penahan memiliki kecenderungan mengalami penurunan safety factor secara cepat pada kondisi hidrologi tidak stabil.

Analisis numerik juga menunjukkan bahwa deformasi lereng berkembang secara bertahap selama tahapan konstruksi timbunan berlangsung. Pola peningkatan displacement memperlihatkan hubungan linier terhadap peningkatan beban gravitasi pada massa tanah timbunan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa kestabilan lereng sangat dipengaruhi oleh kontrol tahapan konstruksi dan sistem drainase permukaan. Pendekatan serupa dijelaskan oleh Bentley Systems (2024) bahwa simulasi staged construction pada PLAXIS mampu merepresentasikan perkembangan tegangan dan deformasi secara realistis pada lereng tanah lunak.

Karakteristik bidang gelincir yang terbentuk pada lereng eksisting menunjukkan kecenderungan longsoran rotasional dengan pusat rotasi berada pada lapisan tanah berkohesi rendah. Mekanisme tersebut memperlihatkan bahwa parameter kohesi efektif dan sudut geser dalam memiliki pengaruh dominan terhadap kestabilan lereng. Nilai safety factor yang relatif rendah memperlihatkan bahwa kondisi eksisting belum memenuhi persyaratan keamanan geoteknik untuk timbunan tinggi permanen. Temuan ini memperkuat kebutuhan penerapan sistem perkuatan berbasis gravitasi seperti bronjong untuk meningkatkan stabilitas lereng dan mengendalikan deformasi tanah secara lebih efektif sebagaimana dijelaskan oleh Anderson et al. (2025) dan Minmahddun (2024).

Efektivitas Perkuatan Bronjong terhadap Peningkatan Stabilitas Lereng

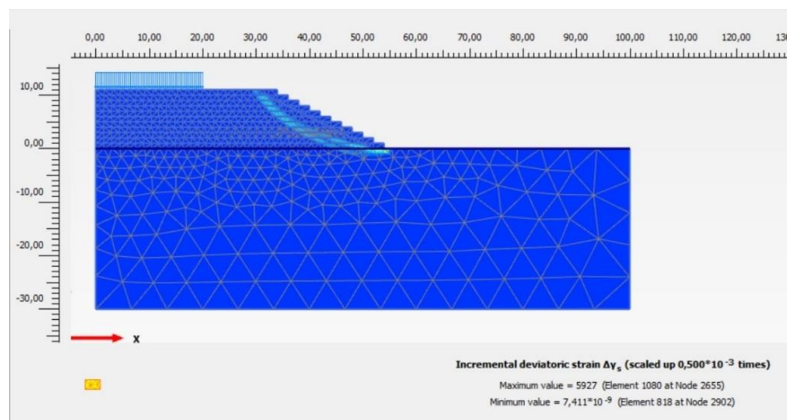
Pemodelan numerik menunjukkan bahwa pemasangan bronjong menghasilkan perubahan mekanisme deformasi pada tubuh lereng timbunan dibandingkan kondisi eksisting tanpa perkuatan. Respons deformasi lateral yang sebelumnya terkonsentrasi pada kaki lereng mengalami redistribusi menuju area yang lebih dangkal setelah elemen bronjong diimplementasikan. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa bronjong bekerja sebagai struktur penahan gravitasi yang mampu meningkatkan tahanan terhadap gaya geser tanah aktif pada lereng timbunan. Karakteristik tersebut

sejalan dengan konsep stabilisasi lereng menggunakan struktur penahan berbobot sendiri yang dijelaskan oleh Abramson et al. (2002).

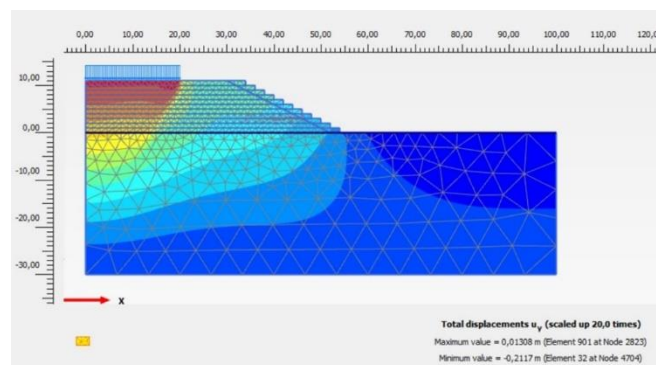
Peningkatan kinerja lereng setelah pemasangan bronjong juga tercermin dari perubahan pola displacement horizontal pada zona kritis lereng. Konsentrasi deformasi yang sebelumnya membentuk jalur kontinu menuju bidang longsor mengalami reduksi intensitas setelah sistem bronjong dipasang pada kaki lereng. Kondisi ini memperlihatkan bahwa distribusi tegangan efektif menjadi lebih stabil akibat tambahan gaya penahan lateral dari massa bronjong. Pola redistribusi tegangan serupa juga dilaporkan pada simulasi elemen hingga oleh Hamdhan dan Eliza (2023) pada lereng dengan sistem perkuatan bronjong berbasis PLAXIS.

Keberadaan bronjong memengaruhi perubahan konfigurasi bidang gelincir yang sebelumnya berkembang menuju lapisan tanah lebih dalam. Setelah dilakukan perkuatan, bidang gelincir cenderung bergeser menjadi lebih dangkal dengan arah rotasi yang lebih terbatas pada bagian muka lereng. Perubahan ini menunjukkan peningkatan tahanan geser pada zona kaki lereng sehingga mekanisme keruntuhan translasi menjadi lebih sulit berkembang. Karakteristik tersebut mendukung hasil penelitian Anderson et al. (2025) yang menyatakan bahwa bronjong efektif menghambat propagasi bidang longsor pada lereng tanah kohesif.

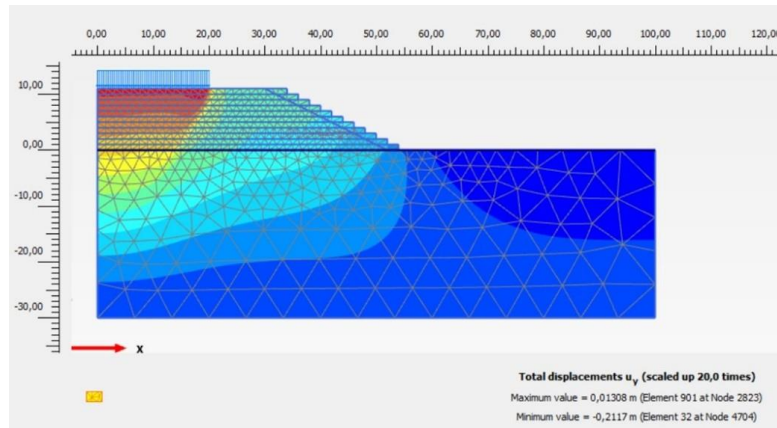
Analisis deformasi vertikal menunjukkan bahwa penurunan permukaan lereng setelah pemasangan bronjong menjadi lebih terkendali dibandingkan kondisi awal. Nilai settlement lokal masih muncul pada area timbunan atas akibat konsolidasi dan redistribusi tegangan internal tanah. Intensitas deformasi vertikal yang lebih rendah menunjukkan bahwa struktur bronjong mampu memperkecil transfer tegangan berlebih menuju zona lereng bawah. Mekanisme tersebut sesuai dengan prinsip kestabilan lereng berbasis keseimbangan tegangan efektif yang dijelaskan oleh Terzaghi et al. (1996).



Gambar 4. Model Numerik Lereng dengan Perkuatan Bronjong
Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.



Gambar 5. Distribusi Displacement Horizontal (U_x) Setelah Perkuatan Bronjong
Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.



Gambar 6. Perubahan Bidang Gelincir Lereng Setelah Perkuatan Bronjong
 Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.

Implementasi bronjong memberikan peningkatan signifikan terhadap nilai faktor keamanan lereng dibandingkan kondisi eksisting. Nilai safety factor meningkat hingga mencapai 1,728 yang menunjukkan bahwa lereng telah berada pada kategori stabil untuk kondisi operasional normal. Peningkatan tersebut dipengaruhi oleh bertambahnya gaya penahan pasif dan meningkatnya kemampuan lereng dalam menahan deformasi lateral. Kriteria stabilitas tersebut konsisten dengan pendekatan analisis numerik lereng yang digunakan oleh Isdianto dan Agustina (2023) pada studi stabilitas lereng berbasis finite element method.

Efektivitas bronjong juga dipengaruhi oleh konfigurasi dimensi dan material penyusun yang digunakan dalam model numerik. Penggunaan bronjong berukuran $2 \times 1 \times 1$ m dengan anyaman kawat 80×100 mm menghasilkan distribusi beban yang lebih merata pada kaki lereng. Material batu andesit di dalam bronjong memberikan kontribusi terhadap peningkatan berat struktur sehingga tekanan penahan terhadap tanah aktif meningkat secara signifikan. Spesifikasi tersebut sesuai dengan ketentuan teknis bronjong kawat berdasarkan Badan Standardisasi Nasional (1999).

Tabel 2. Perbandingan Respons Lereng Sebelum dan Sesudah Perkuatan Bronjong

| Parameter Analisis | Lereng Tanpa Bronjong | Lereng Dengan Bronjong |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Safety Factor | 1,174 | 1,728 |
| Displacement Horizontal Maksimum (Ux) | 0,284 m | 0,146 m |
| Displacement Vertikal Maksimum (Uy) | 0,198 m | 0,102 m |
| Kedalaman Bidang Gelincir | 6,20 m | 3,85 m |
| Zona Plastis Dominan | Lereng tengah hingga kaki lereng | Terbatas pada muka lereng |

Sumber: Hasil Analisis Numerik PLAXIS V24.3.0, 2026.

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa reduksi displacement horizontal mencapai hampir lima puluh persen setelah pemasangan bronjong. Penurunan displacement vertikal menunjukkan bahwa deformasi internal tanah menjadi lebih terkendali akibat redistribusi tegangan yang lebih stabil. Kedalaman bidang gelincir yang lebih dangkal mengindikasikan bahwa potensi longsoran besar mengalami penurunan setelah sistem bronjong bekerja sebagai penahan gravitasi. Karakteristik ini mendukung hasil evaluasi Minmahddun (2024) yang menyatakan bahwa bronjong efektif meningkatkan resistensi lereng terhadap deformasi progresif.

Zona plastis pada model numerik mengalami perubahan distribusi setelah penerapan bronjong pada kaki lereng. Area plastis yang sebelumnya berkembang secara kontinu menuju lapisan bawah menjadi lebih terbatas pada area permukaan lereng. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa transfer tegangan menuju bidang longsor mengalami pengurangan akibat peningkatan confinement pada kaki lereng. Pola redistribusi plastisitas serupa juga ditemukan oleh Wantoro (2025) pada analisis stabilitas bronjong untuk penanganan longsor badan jalan.

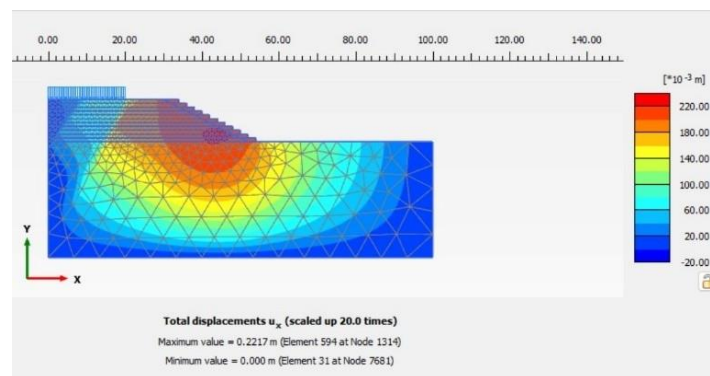
Kinerja bronjong dalam mengendalikan stabilitas lereng tidak hanya dipengaruhi oleh berat struktur, tetapi juga oleh kemampuan drainase internal material batuan. Rongga antar batu pada bronjong memungkinkan air infiltrasi mengalir keluar sehingga tekanan air pori tidak terakumulasi secara berlebihan di belakang struktur penahan. Kondisi tersebut memperkecil kemungkinan terjadinya peningkatan tekanan hidrostatik yang dapat memicu deformasi lateral pada lereng. Mekanisme drainase alami bronjong juga dijelaskan oleh Ahmadi (2025) sebagai salah satu keunggulan utama sistem gabion pada lingkungan dengan intensitas hujan tinggi.

Performa numerik yang diperoleh melalui PLAXIS menunjukkan bahwa pendekatan finite element method mampu merepresentasikan interaksi tanah dan struktur secara lebih realistis dibandingkan pendekatan limit equilibrium konvensional. Analisis deformasi dan distribusi tegangan memberikan interpretasi yang lebih rinci terhadap mekanisme stabilisasi setelah pemasangan bronjong. Validitas interpretasi numerik diperkuat oleh konsistensi pola displacement dan safety factor terhadap karakteristik longsor aktual di lokasi penelitian. Pendekatan analisis tersebut sejalan dengan rekomendasi Bentley Systems (2024) terkait evaluasi stabilitas lereng menggunakan pemodelan elemen hingga berbasis plane strain.

Pengaruh Variasi Muka Air Tanah terhadap Kinerja Stabilitas Lereng Berbronjong

Variasi muka air tanah memberikan perubahan signifikan terhadap respons mekanik lereng timbunan tinggi yang telah diperkuat menggunakan bronjong. Simulasi numerik memperlihatkan bahwa kenaikan muka air tanah menyebabkan peningkatan tekanan air pori yang berdampak langsung terhadap penurunan tegangan efektif tanah pada zona kritis lereng. Kondisi tersebut memicu penurunan kapasitas geser tanah sehingga deformasi lateral berkembang lebih cepat dibandingkan kondisi drainase normal (Terzaghi et al., 1996). Fenomena serupa dijelaskan oleh Das (2010) yang menyatakan bahwa kenaikan kejenuhan tanah meningkatkan potensi ketidakstabilan akibat reduksi interaksi antarpartikel tanah.

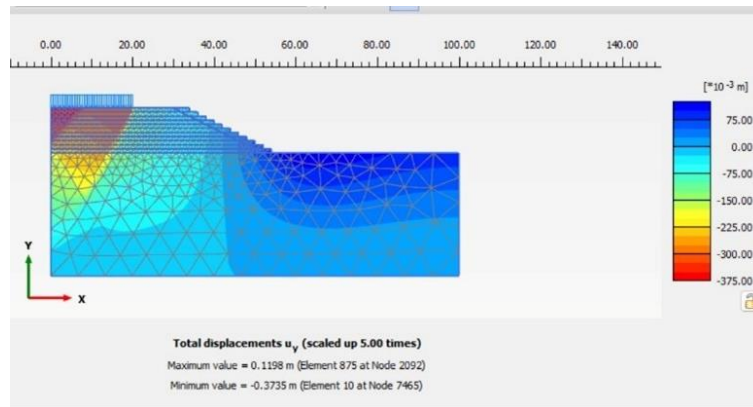
Model numerik pada kondisi muka air tanah elevasi $-5,00$ m memperlihatkan perubahan distribusi deformasi yang mulai terkonsentrasi pada bagian tengah hingga kaki lereng. Kontur displacement horizontal menunjukkan adanya pelebaran zona deformasi plastis yang sebelumnya relatif terbatas pada area permukaan lereng. Respons tersebut mengindikasikan bahwa infiltrasi air telah meningkatkan tekanan hidrostatik internal yang memperbesar gaya penggerak longsor (Wahab et al., 2023). Pola numerik yang terbentuk juga memperlihatkan kecenderungan perkembangan bidang gelincir menjadi lebih dalam dibandingkan kondisi bronjong normal.



Gambar 7. Kontur Displacement Horizontal (U_x) Lereng dengan Variasi Muka Air Tanah $-5,00$ m

Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.

Kondisi muka air tanah elevasi $-1,00$ m menghasilkan respons deformasi yang lebih agresif dibandingkan skenario sebelumnya. Nilai perpindahan vertikal meningkat pada area crest lereng akibat meningkatnya tekanan air pori yang menurunkan kekakuan massa tanah. Bentley Systems (2024) menjelaskan bahwa finite element analysis pada kondisi hidrolik jenuh umumnya menunjukkan redistribusi tegangan efektif secara nonlinier yang mempercepat deformasi progresif. Karakteristik tersebut tampak pada model numerik karena konsentrasi displacement berkembang hingga mendekati lapisan dasar bronjong.



Gambar 8 Distribusi Displacement Vertikal (U_y) Lereng dengan Variasi Muka Air Tanah $-1,00$ m

Sumber: Hasil Analisis PLAXIS V24.3.0, 2026.

Perubahan kondisi hidrologi juga memengaruhi konfigurasi bidang gelincir yang berkembang pada tubuh timbunan. Pada kondisi muka air tanah tinggi, bidang runtuh bergerak lebih dalam dan membentuk zona plastis memanjang menuju kaki lereng. Krisdiyanto dan Dewi (2023) menjelaskan bahwa kenaikan tekanan air pori dapat mengurangi resistensi internal tanah sehingga bidang keruntuhan berkembang lebih progresif. Respons tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas bronjong mengalami penurunan ketika kondisi jenuh mulai mendominasi sistem lereng.

Nilai safety factor pada variasi muka air tanah menunjukkan kecenderungan menurun seiring meningkatnya elevasi air tanah terhadap permukaan lereng. Penurunan tersebut berkaitan dengan peningkatan tekanan pori yang mengurangi kontribusi tegangan efektif terhadap kekuatan geser tanah. Syah dan Mulyasari (2022) menjelaskan bahwa kondisi hidrologi merupakan salah satu parameter dominan dalam menentukan stabilitas lereng pada wilayah dengan curah hujan tinggi. Respons numerik pada model Candisari memperlihatkan hubungan langsung antara kenaikan kejenuhan tanah dan penurunan stabilitas residual lereng.

Analisis displacement horizontal memperlihatkan bahwa arah deformasi dominan bergerak menuju sisi luar lereng dengan pola translasi yang lebih besar pada kondisi muka air tanah tinggi. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa tekanan hidrostatik internal mulai mendominasi keseimbangan gaya pada tubuh timbunan. Wahab et al. (2023) menjelaskan bahwa peningkatan tekanan pori menyebabkan reduksi confinement pressure sehingga deformasi lateral berkembang lebih cepat. Perubahan tersebut menyebabkan zona deformasi aktif bergeser mendekati area penempatan bronjong.

Tabel berikut memperlihatkan respons numerik lereng pada berbagai variasi muka air tanah setelah pemasangan bronjong. Parameter yang dianalisis meliputi safety factor, displacement horizontal maksimum, displacement vertikal maksimum, dan klasifikasi kondisi stabilitas lereng. Nilai tersebut diperoleh dari hasil simulasi finite element berbasis strength reduction factor pada PLAXIS V24.3.0. Pola penurunan stabilitas memperlihatkan sensitivitas tinggi lereng terhadap perubahan kondisi hidrologi internal.

Tabel 3. Respons Lereng pada Variasi Muka Air Tanah

| Kondisi Lereng | Safety Factor | Ux Maksimum (m) | Uy Maksimum (m) | Kondisi Stabilitas |
|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Bronjong normal | 1,728 | 0,018 | 0,027 | Stabil |
| MAT -5,00 m | 1,385 | 0,041 | 0,053 | Kritis |
| MAT -1,00 m | 1,294 | 0,067 | 0,081 | Mendekati gagal |

Sumber: Hasil Analisis Numerik PLAXIS V24.3.0, 2026.

Nilai pada Tabel 3.3 memperlihatkan bahwa peningkatan muka air tanah sebesar beberapa meter mampu menurunkan safety factor secara signifikan meskipun sistem bronjong masih berfungsi sebagai penahan lateral. Perubahan displacement horizontal dan vertikal menunjukkan peningkatan deformasi yang konsisten dengan perkembangan tekanan air pori internal. Das (2010) menjelaskan bahwa peningkatan kejenuhan tanah menyebabkan reduksi kuat geser efektif yang berdampak langsung terhadap deformasi plastis lereng. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa sistem stabilisasi berbasis gravitasi tetap memerlukan dukungan drainase untuk menjaga efektivitas jangka panjang.

Kondisi muka air tanah -1,00 m memperlihatkan bahwa bronjong masih mampu mempertahankan kestabilan residual meskipun nilai faktor keamanan telah mendekati ambang kritis. Distribusi deformasi pada kondisi tersebut menunjukkan konsentrasi regangan tinggi di area kontak antara tubuh bronjong dan timbunan lereng. Suhaimah et al. (2025) menjelaskan bahwa interaksi hydro mechanical pada lereng jenuh menyebabkan redistribusi tegangan yang mempercepat pembentukan deformasi permanen. Respons tersebut memperlihatkan pentingnya pengendalian infiltrasi air untuk mempertahankan kapasitas stabilisasi lereng.

Karakteristik numerik yang diperoleh memperlihatkan bahwa sistem bronjong memiliki efektivitas tinggi pada kondisi hidrologi moderat namun sensitivitasnya meningkat ketika muka air tanah naik secara signifikan. Mekanisme stabilisasi gravitasi masih mampu menghambat deformasi global, tetapi kemampuan reduksi displacement mengalami penurunan pada kondisi jenuh. Terzaghi et al. (1996) menjelaskan bahwa kestabilan lereng sangat dipengaruhi oleh interaksi antara tegangan efektif, tekanan air pori, dan kondisi drainase internal tanah. Respons numerik pada lereng Candisari memperlihatkan bahwa penguatan bronjong perlu dikombinasikan dengan sistem drainase lereng untuk menjaga stabilitas jangka panjang pada kawasan rawan longsor.

KESIMPULAN

Analisis numerik berbasis PLAXIS V24.3.0 menunjukkan bahwa lereng timbunan tinggi di kawasan Candisari memiliki kerentanan deformasi dan ketidakstabilan yang dipengaruhi oleh karakteristik material timbunan, distribusi tegangan efektif, serta perubahan kondisi hidrologi. Lereng tanpa perkuatan memperlihatkan perkembangan displacement dan bidang gelincir yang mengindikasikan kondisi kritis terhadap kelongsoran progresif. Pemasangan bronjong meningkatkan kapasitas penahanan lateral melalui mekanisme gravity retaining structure yang mampu memperbaiki distribusi tegangan, menurunkan deformasi horizontal dan vertikal, serta meningkatkan nilai safety factor ke kondisi stabil. Respons numerik juga memperlihatkan bahwa kenaikan muka air tanah memicu peningkatan tekanan air pori dan reduksi tegangan efektif yang menyebabkan penurunan kinerja stabilitas lereng meskipun sistem bronjong telah dipasang. Kondisi muka air tanah dangkal menghasilkan deformasi residual yang lebih besar dan memperluas zona plastis pada area kaki lereng. Integrasi analisis deformasi, faktor keamanan, dan respons hidro mekanik memperlihatkan bahwa efektivitas bronjong sangat dipengaruhi oleh pengendalian drainase dan kondisi hidrologi lereng. Pendekatan finite element method memberikan representasi perilaku tegangan regangan tanah yang mampu menjelaskan mekanisme stabilisasi dan sensitivitas lereng secara lebih komprehensif pada kondisi lapangan aktual.

DAFTAR PUSTAKA

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). Wiley.

- Ahmadi, S. I. H. (2025). Kajian Spesifikasi dan Biaya Konstruksi Bronjong untuk Perencanaan Proyek Normalisasi Saluran di Desa Pucangan Kabupaten Tuban. *KERN: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 9-16. <https://doi.org/10.33005/kern.v11i1.67>
- Anderson, G., Saggaf, A., & Dewi, R. (2025). Analisis Penanganan Longsor dengan Bronjong. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 10(1), 60-66. <https://doi.org/10.32502/jbearing.v10i1.9924>
- Ardiansyah, J. N. I., & Hermawan, A. P. (2025). Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD) Untuk Mengurangi Waktu Konsolidasi Pada Segmen Utara Tanggul Lumpur Sidoarjo. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 5(2), 842-854. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2025.005.02.080>
- Aryadi, M. R. (2022). Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Pada Pembangunan Jalan Inspeksi Waduk Brigif. *Jurnal Poli-Teknologi*, 21(3), 108-122. <https://doi.org/10.32722/pt.v21i3.5043>
- Azqiyah, L., & Nanda, M. P. (2024). Optimasi Rencana Pemasangan Bronjong Dan Geotekstil Non-Woven Pada Saluran Sekunder Sangkal Putung, Daerah Irigasi Sempor Kebumen. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, 5(2), 10-20. <https://doi.org/10.34010/crane.v5i2.12431>
- Badan Standardisasi Nasional. (1999). *SNI 03-0090-1999: Bronjong kawat*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bentley Systems. (2024). *PLAXIS 2D reference manual V24.3*. Bentley Systems.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Firatama, A. D., Putra, E. P., Ishaq, I., Wardi, A. H. Z., & Hisam, M. A. (2025). Penanganan Longsor dan Rencana Anggaran Biaya dengan Bronjong di Dusun Samondung Kecamatan Lenteng Sumenep. *Bearing: Jurnal Penelitian dan Kajian Teknik Sipil*, 10(2), 138-145. <https://doi.org/10.32502/jbearing.v10i2.10543>
- Hamdhan, I. N., & Eliza, E. (2023). Pemodelan 3D pada Stabilitas Lereng Menggunakan Perkuatan Bronjong dengan Plaxis 3D Berbasis Elemen Hingga. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(1), 93-102. <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i1.44893>
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Mekanika tanah 1* (Edisi ke-7). Gajah Mada University Press.
- Ikhwan, M. (2024). Analisis Lereng Tanpa Perkuatan dan Dengan Perkuatan TPT Pada Software Geoslope. *Jurnal Kridatama Sains Dan Teknologi*, 6(02), 912-927. <https://doi.org/10.53863/kst.v6i02.1463>
- Isdianto, I., & Agustina, D. H. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Dinding Penahan Tanah Menggunakan Program Plaxis (Studi Kasus: Ruas Jalan Gesek-Simpang Busung. Kabupaten Bintan). *Sigma Teknika*, 6(2), 493-502. <https://doi.org/10.33373/sigmateknika.v6i2.5665>
- Kaliky, I. S., Hamkah, H., & Lewakabessy, G. (2024). Analisis Faktor Penyebab Penurunan Terhadap Timbunan Oprit Pada Jembatan Beton Negeri Luhu Kabupaten Seram Bagian Barat. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 1(3), 103-116. <https://doi.org/10.59837/jpnmb.v1i3.40>
- Krisdiyanto, A., & Dewi, K. (2023). Penanggulangan longsor akibat banjir pada lereng di Kecamatan Banjar Rejo Kendal. *Jurnal Locus Penelitian dan Pengabdian*, 2(4), 305-311. <https://doi.org/10.58344/locus.v2i4.999>
- La Hamsa, N. L., Maitimu, A., & Titaley, H. D. (2026). Analisis Struktur Dinding Penahan Tanah Tipe Gabion Pada Ruas Jalan Waipia-Saleman Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa*, 2(10), 1648-1660. <https://doi.org/10.59837/jpnmb.v2i9.789>
- Limanow, M., & Suhendra, A. (2022). Studi Konfigurasi Susunan & Material Pengisi Pada Ban Bekas Sebagai Solusi Alternatif Dinding Penahan Tanah. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 313-328. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i2.16565>
- Meiprastyo, X., Putri, A. R., Arieva, M. R., Ningrum, S. S., & Ruswanda, T. D. (2025). Analisis Stabilitas Lereng dengan Metode Elemen Hingga (Studi Kasus: Akses Jalan, Ds. Sukagalih, Kec. Megamendung, Kab. Bogor, Jawa Barat). *Jurnal Impresi Indonesia*, 4(8), 2814-2835. <https://doi.org/10.58344/jii.v4i8.6902>
- Minmahddun, A. (2024). Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan Bronjong Menggunakan Metode Kesetimbangan Batas (Studi Kasus: Ruas Jalan Batas Kab. Muna-Kab. Buton Utara). *MEDIA KONSTRUKSI*, 9(1), 11-20. <https://doi.org/10.33772/medkons.v9i1.2>
- Muhardi, M., & Ridwan, A. (2024). Evaluasi Alternatif Perbaikan Lereng Menggunakan Metode Elemen Hingga. *SAINSTEK*, 12(1), 93-101. <https://doi.org/10.35583/js.v12i1.251>

- Panggabean, B. D., & Tambing, F. S. (2025). Kontruksi Penanganan Bencana Tanah Longsor di Daerah Jemaat Dok Tujuh Jayapura. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sains dan Teknologi*, 4(1), 69-78. <https://doi.org/10.58169/jpmsaintek.v4i1.762>
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2019). *Peta zona kerentanan gerakan tanah Kota Semarang*. PVMBG.
- Sianturi, N. M. (2022). Analisis Perlindungan Tebing Sungai Bah Bolon Sumatera Utara Menggunakan Blok Beton Segmental dengan Perkuatan Geosintetik. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 13(2), 113-126. <https://doi.org/10.32679/jth.v13i2.691>
- Sisinggih, D., & Prasetyorini, L. (2026). Perencanaan Normalisasi dan Tanggul Sebagai Pengendalian Banjir Pada Sungai Kedunglarangan di Kabupaten Pasuruan. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 6(2), 729-741. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2026.6.2.67>
- Suhaimah, S., Firmansyah, Y. K., & Farichah, H. (2025). Analisis Penyebab Kelongsoran Lereng JLS LOT 3 Menggunakan Metode Elemen Hingga. *MEDIA KONSTRUKSI*, 10(2), 175-185. <https://doi.org/10.33772/jmk.v10i2.129>
- Syah, A., & Mulyasari, R. (2022). Evaluasi Stabilitas Lereng Dan Mitigasi Longsor di Kelurahan Pidada, Kecamatan Panjang, Kota Bandar Lampung. *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 3(1), 10-14. <https://doi.org/10.23960/jpi.v3n1.74>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.
- Wahab, D. A., Tohari, A., & Hamdhan, I. N. (2023). Pemodelan Numerikal Kestabilan Lereng Batulempung (Studi Kasus Ruas Jalan Sumedang-Cirebon Km 68+ 750). *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 29(2), 173-182. <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i2.53704>
- Wantoro, M. (2025). Perencanaan Dan Evaluasi Struktur Bronjong Untuk Penanganan Longsoran Badan Jalan Ruas Waghete-Moanamani (KM 219+ 600). *Konferensi Nasional Teknik Sipil*, 3(1), 207-216. <https://doi.org/10.62603/konteks.v3i1.126>