



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 239-248
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteleteknika.com/scripta-technica>

Pengaruh Siklus Beban Gempa Berulang terhadap Perilaku Tanah yang Diperkuat Geosintetik

Muhammad Satria Pandu Justitia^{1*}, Taufik Efendi Fadil², Pratikso³, Lisa Fitriyana⁴

¹⁻⁴ Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

email: satriapandu72@gmail.com¹, taufikfadil1231@gmail.com²

Article Info :

Received:

24-04-2026

Revised:

06-05-2026

Accepted:

14-05-2026

Abstract

This study aims to analyze the effect of repeated seismic loading cycles on the mechanical behavior of geosynthetic-reinforced soil using a numerical simulation approach based on the finite element method. Modeling was performed using PLAXIS 2D v22, representing a 10-meter-high soil embankment on soft subgrade based on Standard Penetration Test data from the Solo–Yogyakarta Toll Road project at STA 0+616. Reinforcement systems using woven and non-woven geotextiles were modeled under cyclic loading conditions in the form of a sinusoidal wave with a maximum ground acceleration of 0.4562 g, a frequency of 0.8 Hz, and 50 loading cycles. The analysis results show that the use of geosynthetics is capable of improving system stability and significantly reducing deformation compared to unreinforced soil. Woven geotextiles produced the most optimal response with a maximum deformation of 2.699×10^{-3} m and a safety factor of 1.488 due to their higher tensile stiffness capacity. Non-woven geotextiles still improved soil performance, but their effectiveness was lower under repeated dynamic loading. The mechanical response of the soil is influenced by soil–geosynthetic interaction, dynamic stress distribution, reinforcement layer configuration, and cyclic loading characteristics. The research findings underscore the importance of integrating dynamic analysis into geotechnical design in earthquake-prone regions to enhance the long-term stability and resilience of infrastructure.

Keywords: *Cyclic Earthquake Loading, Geosynthetics, PLAXIS 2D, Soil Stability, Soft Soil.*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh siklus beban gempa berulang terhadap perilaku mekanis tanah yang diperkuat geosintetik menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga. Pemodelan dilakukan menggunakan PLAXIS 2D v22 dengan representasi timbunan tanah setinggi 10 m pada tanah dasar lunak berdasarkan data Standard Penetration Test proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta STA 0+616. Sistem perkuatan menggunakan geotekstil woven dan non-woven dimodelkan pada kondisi cyclic loading berbentuk gelombang sinusoidal dengan percepatan tanah maksimum 0,4562 g, frekuensi 0,8 Hz, dan 50 siklus pembebanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan geosintetik mampu meningkatkan kestabilan sistem dan mengurangi deformasi secara signifikan dibandingkan tanah tanpa perkuatan. Geotekstil woven menghasilkan respons paling optimal dengan deformasi maksimum $2,699 \times 10^{-3}$ m dan safety factor 1,488 akibat kapasitas tensile stiffness yang lebih tinggi. Geotekstil non-woven tetap meningkatkan performa tanah, namun efektivitasnya lebih rendah pada pembebanan dinamis berulang. Respons mekanis tanah dipengaruhi oleh interaksi tanah–geosintetik, distribusi tegangan dinamis, konfigurasi lapisan perkuatan, dan karakteristik cyclic loading. Temuan penelitian menegaskan pentingnya integrasi analisis dinamis dalam desain geoteknik pada wilayah rawan gempa untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan infrastruktur jangka panjang.

Kata kunci: *Beban Gempa Siklik, Geosintetik, PLAXIS 2D, Stabilitas Tanah, Tanah Lunak.*



©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

Aktivitas seismik global yang semakin intensif dalam dua dekade terakhir telah mendorong transformasi paradigma rekayasa geoteknik dari pendekatan statik-konvensional menuju pendekatan resilien berbasis perilaku dinamis tanah–struktur, terutama pada infrastruktur transportasi dan timbunan tanah yang berada di kawasan tektonik aktif. Perubahan orientasi tersebut muncul karena kerusakan geoteknik akibat gempa tidak lagi dipahami semata sebagai kegagalan struktur permukaan, melainkan sebagai konsekuensi kompleks dari degradasi kapasitas geser tanah, peningkatan tekanan air pori, deformasi permanen, dan instabilitas progresif akibat pembebanan siklik berulang. Material geosintetik berkembang menjadi salah satu inovasi paling signifikan dalam rekayasa tanah modern karena mampu

meningkatkan confinements, redistribusi tegangan, dan ketahanan deformasi pada sistem timbunan maupun lereng diperkuat. Penelitian mengenai reinforced soil system menunjukkan bahwa interaksi tanah–geosintetik memiliki pengaruh langsung terhadap mekanisme transfer beban dinamis dan disipasi energi seismik, khususnya pada tanah granular dan tanah lunak dengan karakteristik deformabilitas tinggi (Liu et al., 2022). Kajian mengenai stabilitas seismik pada struktur mechanically stabilized earth wall juga memperlihatkan bahwa penggunaan geotekstil mampu meningkatkan faktor keamanan lereng terhadap percepatan gempa lateral yang tinggi, meskipun respons sistem tetap sangat dipengaruhi oleh jenis material penguat, konfigurasi lapisan, dan intensitas pembebanan dinamis (Rizali & Purwana, 2024). Relevansi isu ini menjadi semakin strategis bagi Indonesia sebagai negara dengan tingkat hazard seismik tertinggi di dunia akibat interaksi lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik yang menghasilkan frekuensi gempa tinggi serta distribusi wilayah rawan longsor dan likuifaksi yang luas (Setiawan et al., 2023). Kerangka regulasi nasional melalui SNI 1726 juga menegaskan pentingnya integrasi parameter ketahanan gempa dalam seluruh desain struktur dan geoteknik, termasuk pada konstruksi timbunan dan perkuatan tanah yang berada pada zona percepatan tanah tinggi (Nasional, 2012).

Perkembangan literatur internasional menunjukkan bahwa studi mengenai tanah diperkuat geosintetik di bawah pembebanan siklik telah mengalami diversifikasi metodologis, mulai dari pengujian laboratorium cyclic triaxial, centrifuge modelling, hingga simulasi numerik berbasis finite element analysis untuk mengevaluasi respons deformasi dan perubahan kekuatan tanah akibat repetisi beban dinamis. Ferreira et al. (2024) mengemukakan bahwa pembebanan siklik menyebabkan penurunan signifikan pada karakteristik interaksi tanah–geogrid, khususnya pada parameter pullout resistance dan interface shear strength, sehingga efektivitas geosintetik tidak dapat diasumsikan konstan sepanjang umur layan struktur. Temuan tersebut diperkuat oleh Vivek (2024) yang menunjukkan bahwa penguatan geotekstil pada lapisan pasir di atas tanah lempung mampu mereduksi deformasi vertikal akibat cyclic loading, namun efektivitas reduksi tersebut mengalami fluktuasi bergantung pada frekuensi dan jumlah siklus pembebanan. Pada konteks perilaku tanah granular, Denine et al. (2022) menemukan bahwa metode preparasi sampel dan keberadaan geotekstil secara langsung memengaruhi respons liquefaction resistance tanah pasir, sehingga interaksi mekanik antara tanah dan geosintetik tidak dapat dipisahkan dari kondisi mikrostruktur tanah itu sendiri. Penelitian lain memperlihatkan bahwa cyclic loading juga memicu internal instability dan fluidisation pada subgrade soil akibat redistribusi partikel dan akumulasi deformasi plastis yang terus berkembang selama pembebanan berulang (Indraratna et al., 2022). Sintesis dari berbagai studi tersebut menunjukkan bahwa geosintetik memang memiliki kemampuan meningkatkan stabilitas dinamis tanah, namun mekanisme peningkatan tersebut tidak bersifat universal karena sangat dipengaruhi oleh sifat tanah, jenis geosintetik, konfigurasi geometri, serta karakteristik beban gempa yang bekerja secara simultan.

Meskipun perkembangan penelitian mengenai reinforced soil system telah cukup luas, lanskap literatur masih menunjukkan fragmentasi konseptual dan empiris yang signifikan, terutama terkait pemahaman mengenai degradasi performa geosintetik akibat pembebanan gempa berulang pada kondisi tanah tropis dan seismik aktif. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada evaluasi static stability atau cyclic response dalam skala laboratorium terkontrol sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi lapangan yang kompleks, khususnya pada sistem timbunan dengan variasi lapisan tanah heterogen dan percepatan gempa aktual. Penelitian Liu et al. (2022) misalnya lebih menitikberatkan pada distribusi reinforcement load pada embankment model tanpa mengkaji evolusi deformasi permanen akibat akumulasi siklus dinamis jangka panjang. Kajian Ferreira et al. (2024) berhasil menunjukkan penurunan karakteristik interaksi tanah–geogrid, namun belum mengintegrasikan variasi intensitas seismic loading dan pengaruh konfigurasi lapisan perkuatan terhadap perubahan faktor keamanan sistem secara keseluruhan. Di sisi lain, penelitian geoteknik di Indonesia masih didominasi oleh pendekatan stabilitas lereng statik atau pseudo-static yang cenderung menyederhanakan perilaku dinamis tanah sebagai beban lateral ekuivalen, padahal mekanisme cyclic degradation berlangsung secara progresif dan nonlinier selama siklus gempa terjadi (Ramadhan et al., 2025). Literatur nasional mengenai pengaruh geosintetik terhadap tanah kohesif juga lebih berorientasi pada peningkatan kuat geser konvensional dibandingkan analisis respons dinamis dan redistribusi tegangan akibat pembebanan siklik (Putri et al., 2025). Ketidakkonsistenan tersebut memperlihatkan bahwa hubungan antara jenis geosintetik, akumulasi siklus gempa, deformasi tanah, dan perubahan stabilitas global

masih belum dipahami secara komprehensif, terutama pada konteks rekayasa timbunan di wilayah seismik tropis.

Keterbatasan pemahaman tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang sangat serius karena kegagalan struktur tanah diperkuat pada kawasan seismik tidak hanya menyebabkan kerusakan fisik infrastruktur, tetapi juga menimbulkan gangguan sistemik terhadap konektivitas transportasi, logistik nasional, dan keselamatan masyarakat. Karakteristik tanah lunak dan residual yang banyak dijumpai pada proyek infrastruktur di Indonesia menyebabkan timbunan jalan, dinding penahan tanah, dan lereng buatan menjadi sangat rentan terhadap deformasi progresif ketika menerima beban gempa berulang dengan amplitudo tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan desain berbasis faktor keamanan statik semata tidak lagi memadai untuk menjamin stabilitas jangka panjang struktur geoteknik di kawasan aktif seismik. Ketidakmampuan desain konvensional dalam menangkap mekanisme redistribusi tegangan dan penurunan kekuatan akibat cyclic loading berpotensi menghasilkan underestimation terhadap risiko deformasi permanen maupun keruntuhan progresif sistem timbunan. Persoalan tersebut semakin penting karena pembangunan infrastruktur strategis nasional, termasuk jalan tol dan jaringan transportasi regional, banyak dilakukan pada wilayah dengan nilai peak ground acceleration tinggi sebagaimana tercermin dalam peta bahaya gempa nasional (Nasional, 2012). Kebutuhan terhadap model analisis numerik yang mampu merepresentasikan interaksi dinamis tanah–geosintetik secara lebih realistis menjadi sangat mendesak, khususnya untuk menghasilkan parameter desain yang tidak hanya memenuhi aspek kekuatan, tetapi juga ketahanan deformasi dan keberlanjutan performa material selama siklus gempa berulang.

Penelitian ini menempatkan diri pada persimpangan antara rekayasa geoteknik dinamis, mekanika tanah diperkuat, dan analisis numerik berbasis finite element, dengan fokus khusus pada evaluasi perilaku tanah timbunan yang diperkuat geotekstil woven dan non-woven terhadap siklus pembebanan gempa berulang. Posisi riset ini berbeda dari penelitian terdahulu karena tidak hanya mengevaluasi perubahan faktor keamanan atau deformasi akhir sistem, melainkan juga mengkaji hubungan antara karakteristik cyclic loading dengan respons mekanis tanah yang diperkuat melalui simulasi numerik berbasis data lapangan aktual Standard Penetration Test pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi yang lebih representatif terhadap pengaruh jenis geosintetik, distribusi tegangan dinamis, pola deformasi lateral dan vertikal, serta kapasitas sistem dalam mempertahankan kestabilan selama akumulasi siklus gempa. Fokus terhadap perbandingan woven dan non-woven geotextile juga memberikan kontribusi penting dalam memahami bagaimana perbedaan karakteristik tensile strength, permeabilitas, dan mekanisme interlock memengaruhi respons tanah terhadap pembebanan dinamis berulang, suatu aspek yang masih relatif jarang dibahas secara simultan dalam literatur geoteknik seismik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh siklus beban gempa berulang terhadap perilaku mekanis tanah yang diperkuat geosintetik melalui simulasi numerik menggunakan PLAXIS 2D pada kondisi timbunan tanah di wilayah rawan gempa. Kajian ini dirancang untuk mengevaluasi deformasi, distribusi tegangan, kapasitas dukung, dan stabilitas sistem tanah diperkuat akibat pembebanan siklik hingga puluhan siklus gempa, sekaligus membandingkan efektivitas geotekstil woven dan non-woven dalam meningkatkan performa geoteknik tanah. Kontribusi teoretis penelitian terletak pada pengembangan pemahaman mengenai interaksi dinamis tanah–geosintetik dalam kondisi cyclic degradation, sedangkan kontribusi metodologis diwujudkan melalui integrasi data geoteknik lapangan, pemodelan finite element, dan simulasi seismic cyclic loading sebagai pendekatan evaluasi stabilitas yang lebih komprehensif untuk perencanaan infrastruktur geoteknik di kawasan seismik aktif.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi non-empiris berbasis simulasi numerik yang dirancang untuk menganalisis pengaruh siklus beban gempa berulang terhadap perilaku mekanis tanah yang diperkuat geosintetik menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D v22 berbasis metode elemen hingga (finite element method). Kerangka pemodelan dikembangkan dengan merepresentasikan timbunan tanah setinggi 10 m pada kondisi tanah dasar lunak menggunakan model material Mohr–Coulomb untuk menggambarkan hubungan tegangan–regangan tanah secara elastoplastis. Data parameter tanah diperoleh dari hasil Standard Penetration Test (SPT) proyek pembangunan Jalan Tol Solo–Yogyakarta STA 0+616 yang meliputi berat isi tanah, kohesi, sudut geser dalam, modulus elastisitas, dan rasio Poisson. Sistem perkuatan dimodelkan menggunakan dua jenis geotekstil, yaitu woven dan non-woven,

dengan parameter tensile strength, stiffness, dan spacing vertikal yang dihitung berdasarkan distribusi tekanan lateral tanah aktif. Beban gempa dimodelkan sebagai cyclic loading berbentuk gelombang sinusoidal dengan percepatan puncak tanah sebesar 0,4562 g, frekuensi 0,8 Hz, dan total 50 siklus pembebanan selama 62,5 detik. Seluruh tahapan simulasi meliputi pembuatan geometri, definisi material, pembentukan mesh elemen, penentuan kondisi batas, tahapan konstruksi timbunan bertahap, hingga implementasi beban dinamis pada model numerik.

Analisis teknis dilakukan melalui simulasi komparatif antara tiga kondisi model, yaitu tanah tanpa perkuatan, tanah diperkuat geotekstil woven, dan tanah diperkuat geotekstil non-woven, untuk mengevaluasi respons deformasi dan kestabilan sistem akibat pembebanan siklik. Prosedur simulasi diawali dengan tahap initial stress generation menggunakan metode Ko-procedure, dilanjutkan dengan staged construction untuk merepresentasikan proses penimbunan aktual, dan diakhiri dengan dynamic analysis menggunakan time-history cyclic loading. Evaluasi kinerja sistem dilakukan berdasarkan parameter deformasi total, perpindahan vertikal dan lateral, distribusi tegangan, nilai faktor keamanan (safety factor), serta tekanan maksimum (Pmax) yang dihasilkan selama simulasi dinamis. Validasi konseptual model dilakukan melalui perbandingan respons numerik terhadap karakteristik perilaku tanah diperkuat yang telah dilaporkan dalam literatur geoteknik dinamis dan ketentuan desain seismik nasional. Pendekatan ini dipilih untuk menghasilkan reproduktifitas analisis yang tinggi serta memungkinkan identifikasi hubungan antara jenis geosintetik, intensitas pembebanan siklik, dan perubahan perilaku mekanis tanah secara lebih terukur dan sistematis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons Deformasi Tanah Timbunan Tanpa dan Dengan Perkuatan Geosintetik

Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa perilaku deformasi tanah timbunan sangat dipengaruhi oleh keberadaan lapisan perkuatan geosintetik pada kondisi pembebanan bertahap maupun pembebanan dinamis. Model tanpa perkuatan memperlihatkan akumulasi deformasi vertikal yang terkonsentrasi pada zona tengah timbunan akibat redistribusi tegangan ke lapisan tanah lunak di bawahnya. Fenomena tersebut berkaitan dengan rendahnya kapasitas confinements tanah dasar sehingga transfer tegangan berlangsung secara tidak merata pada arah lateral dan vertikal. Karakteristik deformasi seperti ini konsisten dengan pola penurunan progresif pada tanah lunak yang dilaporkan oleh Widiyanti (2012) dalam kajian peningkatan daya dukung tanah menggunakan geosintetik.

Analisis deformasi pada model tanpa perkuatan memperlihatkan bahwa nilai displacement maksimum mencapai 0,1462 m setelah konstruksi bertahap selesai dilakukan. Konsentrasi regangan plastis muncul pada daerah kaki lereng yang mengalami peningkatan tegangan geser akibat beban timbunan sebesar 15 kN/m². Distribusi deformasi vertikal memperlihatkan kecenderungan settlement tidak seragam yang mengindikasikan rendahnya kestabilan internal sistem tanah. Temuan ini memiliki kesesuaian dengan penelitian Laksono dan Prihatiningsih (2025) yang menjelaskan bahwa lereng tanpa perkuatan mengalami peningkatan deformasi lateral secara signifikan ketika menerima kombinasi beban gravitasi dan gaya dinamis.

Penerapan geotekstil woven menghasilkan perubahan pola distribusi tegangan yang lebih stabil dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Nilai deformasi maksimum menurun menjadi 0,05254 m akibat meningkatnya mekanisme interlock dan tensile resistance pada lapisan geotekstil. Tegangan vertikal yang sebelumnya terpusat pada lapisan tanah dasar mengalami redistribusi menuju area perkuatan sehingga konsentrasi regangan menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa woven geotextile mampu meningkatkan stabilitas internal tanah melalui mekanisme confinement yang lebih efektif sebagaimana dijelaskan oleh Hayati et al. (2025).

Model dengan geotekstil non-woven menunjukkan respons deformasi yang lebih baik dibandingkan tanah tanpa perkuatan, namun masih lebih tinggi dibandingkan model woven. Nilai deformasi maksimum tercatat sebesar 0,1396 m dengan pola settlement yang masih dominan pada bagian tengah timbunan. Struktur serat acak pada non-woven memberikan kemampuan drainase yang baik, tetapi kapasitas tensile stiffness lebih rendah dibandingkan woven sehingga reduksi deformasi tidak berlangsung optimal. Hasil tersebut mendukung observasi Denine et al. (2022) yang menyatakan bahwa karakteristik mikrostruktur geotekstil sangat memengaruhi perilaku deformasi tanah granular pada kondisi pembebanan.

Perbandingan respons deformasi dari ketiga model memperlihatkan hubungan langsung antara kekuatan tarik geosintetik dan kemampuan sistem menahan deformasi permanen. Geotekstil woven

menghasilkan distribusi displacement yang lebih homogen karena kemampuan transfer tegangan berlangsung lebih merata di sepanjang lapisan perkuatan. Kondisi ini menyebabkan peningkatan kapasitas dukung efektif pada tanah dasar dan menurunkan konsentrasi tegangan lokal. Kajian mengenai reinforced embankment oleh Liu et al. (2022) juga menunjukkan bahwa distribusi reinforcement load yang stabil dapat mengurangi deformasi diferensial pada struktur timbunan.

Tabel berikut menunjukkan perbandingan nilai deformasi maksimum dan faktor keamanan pada setiap model simulasi. Nilai tersebut diperoleh dari hasil analisis staged construction menggunakan metode finite element berbasis model Mohr–Coulomb. Perbedaan respons mekanis antara woven dan non-woven terlihat jelas pada perubahan nilai displacement dan safety factor sistem. Karakteristik ini menunjukkan bahwa parameter stiffness material menjadi faktor dominan dalam mengendalikan deformasi tanah lunak.

Tabel 1. Perbandingan Nilai Deformasi Maksimum dan Safety Factor pada Tanah Timbunan dengan Variasi Perkuatan Geosintetik

Model Timbunan	Deformasi Maksimum (m)	Safety Factor
Tanpa Perkuatan	0,1462	1,272
Geotekstil Woven	0,05254	1,488
Geotekstil Non-Woven	0,1396	1,334

Nilai safety factor pada model woven meningkat hingga 1,488 yang menunjukkan kondisi kestabilan lebih baik dibandingkan model lainnya. Peningkatan ini berkaitan dengan kemampuan woven geotextile dalam menahan gaya tarik dan mengurangi perkembangan bidang longsor potensial. Distribusi tegangan pada area timbunan juga menjadi lebih terkendali karena lapisan geotekstil bekerja sebagai elemen pengikat antarpartikel tanah. Hasil serupa dijelaskan oleh Rizali dan Purwana (2024) pada evaluasi seismic safety MSE wall yang menunjukkan bahwa geotekstil berkekuatan tinggi mampu meningkatkan kestabilan lereng secara signifikan.

Karakteristik deformasi pada model non-woven memperlihatkan bahwa kapasitas drainase tidak selalu berkorelasi langsung dengan peningkatan kekuatan sistem secara keseluruhan. Walaupun aliran tekanan air pori dapat direduksi lebih baik, kemampuan menahan deformasi lateral tetap bergantung pada nilai tensile modulus material. Interaksi antara tanah dan lapisan non-woven menghasilkan redistribusi tegangan yang masih relatif terbatas pada area tertentu. Pola tersebut memiliki kesesuaian dengan penelitian Sitompul dan Desiani (2025) mengenai interaksi tanah dan material ringan yang menunjukkan bahwa respons kuat geser sangat dipengaruhi oleh kekakuan material perkuatan.

Distribusi deformasi pada seluruh model juga menunjukkan adanya pengaruh konfigurasi spacing vertikal terhadap respons mekanis tanah timbunan. Lapisan woven yang memiliki jumlah perkuatan lebih sedikit tetap menghasilkan deformasi lebih rendah dibandingkan non-woven karena nilai tensile strength yang lebih besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa efektivitas geosintetik tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah lapisan, tetapi juga kapasitas tarik dan mekanisme transfer tegangan antarpartikel tanah. Kajian numerik menggunakan PLAXIS oleh Indriani (2025) memperlihatkan kecenderungan yang sama pada perbaikan tanah lunak menggunakan lapisan geotekstil.

Pengamatan terhadap kontur deformasi memperlihatkan bahwa zona displacement terbesar selalu berada pada area kontak antara timbunan dan tanah dasar lunak. Fenomena tersebut berkaitan dengan terjadinya konsentrasi tegangan vertikal akibat perbedaan modulus elastisitas antar lapisan tanah. Kehadiran geotekstil woven mampu mengurangi ketimpangan modulus tersebut sehingga deformasi menjadi lebih stabil dan terkendali. Pola respons ini mendukung konsep penguatan tanah menggunakan material geosintetik yang dikembangkan oleh Nugroho dalam studi mengenai redistribusi tegangan pada lapisan perkerasan diperkuat geosintetik.

Respons deformasi yang diperoleh dari simulasi menunjukkan bahwa penggunaan geosintetik memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan performa geoteknik tanah timbunan pada kondisi statik awal. Woven geotextile memperlihatkan kapasitas reduksi deformasi paling tinggi karena memiliki kekakuan tarik dan mekanisme penguncian partikel yang lebih kuat dibandingkan non-woven. Perbedaan perilaku mekanis tersebut memperlihatkan bahwa pemilihan jenis geosintetik harus

mempertimbangkan karakteristik pembebanan dan kondisi tanah dasar secara spesifik. Evaluasi seperti ini menjadi penting pada wilayah rawan gempa dengan tanah lunak dominan sebagaimana dipetakan dalam analisis bahaya seismik oleh Setiawan et al. (2023).

Pengaruh Siklus Beban Gempa Berulang terhadap Distribusi Tegangan dan Stabilitas Dinamis Tanah Diperkuat

Penerapan beban gempa siklik pada model numerik menghasilkan perubahan respons mekanis yang signifikan pada seluruh konfigurasi timbunan. Pola distribusi tegangan menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi tegangan dinamis pada bagian kaki lereng dan lapisan tanah dasar akibat propagasi gelombang sinusoidal selama 50 siklus pembebanan. Model tanpa perkuatan mengalami akumulasi displacement yang lebih cepat karena energi dinamis tidak dapat didistribusikan secara efektif menuju lapisan tanah yang lebih stabil. Karakteristik tersebut memiliki kesesuaian dengan mekanisme cyclic degradation yang dijelaskan oleh Ferreira et al. (2024) pada interaksi tanah dan geogrid akibat pembebanan berulang.

Simulasi dynamic loading memperlihatkan bahwa geotekstil woven menghasilkan respons stabilitas paling baik dibandingkan model lainnya. Nilai deformasi maksimum hanya mencapai $2,699 \times 10^{-3}$ m dengan distribusi displacement yang relatif homogen pada area timbunan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa woven geotextile memiliki kemampuan disipasi energi dinamis yang lebih tinggi sehingga akumulasi regangan plastis dapat ditekan secara signifikan. Temuan ini memperkuat observasi Zhou et al. (2025) yang menjelaskan bahwa sistem perkuatan geosintetik mampu meningkatkan seismic resistance pada struktur tanah granular selama urutan mainshock–aftershock.

Model non-woven juga mengalami peningkatan performa dibandingkan kondisi tanpa perkuatan, namun kapasitas reduksi deformasi masih berada di bawah woven geotextile. Deformasi maksimum tercatat sebesar 0,1202 m dengan distribusi tegangan yang masih menunjukkan konsentrasi lokal pada area dasar timbunan. Kapasitas tensile stiffness yang lebih rendah menyebabkan transfer beban dinamis berlangsung kurang optimal selama siklus pembebanan. Fenomena tersebut sejalan dengan hasil penelitian Vivek (2024) yang menunjukkan bahwa efektivitas geotekstil terhadap cyclic loading sangat dipengaruhi oleh karakteristik material dan pola deformasi tanah dasar.

Perubahan distribusi tegangan akibat cyclic loading menunjukkan bahwa interaksi tanah–geosintetik berperan penting dalam menghambat perkembangan deformasi permanen. Lapisan woven mampu membentuk mekanisme confinement yang menjaga kestabilan butiran tanah selama propagasi getaran berlangsung. Tegangan dinamis yang sebelumnya terkonsentrasi pada satu zona tertentu mengalami redistribusi menuju lapisan geotekstil sehingga amplitudo deformasi menjadi lebih kecil. Kondisi ini berkaitan dengan teori transfer tegangan pada reinforced soil system yang dikembangkan oleh Liu et al. (2022).

Analisis terhadap pola deformasi lateral memperlihatkan bahwa model tanpa perkuatan mengalami peningkatan perpindahan horizontal yang cukup besar selama pembebanan dinamis berlangsung. Perpindahan tersebut muncul akibat ketidakmampuan tanah lunak dalam mempertahankan kestabilan internal ketika menerima percepatan tanah sebesar 0,4562 g. Lapisan tanah dasar mengalami pelemahan progresif akibat akumulasi tegangan siklik yang memicu penurunan kapasitas geser efektif. Fenomena serupa dijelaskan oleh Indrarnatna et al. (2022) yang mengaitkan cyclic loading dengan terjadinya fluidisation dan internal instability pada subgrade soil.

Tabel berikut menunjukkan perbandingan parameter deformasi dan tekanan maksimum pada model timbunan setelah menerima beban gempa siklik sebanyak 50 siklus. Data numerik memperlihatkan bahwa woven geotextile menghasilkan respons dinamis paling stabil dibandingkan konfigurasi lainnya. Nilai Pmax pada kedua model geotekstil relatif serupa, namun perbedaan besar terjadi pada deformasi total sistem. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kapasitas distribusi tegangan tidak hanya ditentukan oleh besarnya tekanan, tetapi juga kemampuan material dalam mereduksi regangan dinamis.

Tabel 2. Perbandingan Deformasi Maksimum dan Tekanan Maksimum (Pmax) Tanah Timbunan Diperkuat Geosintetik terhadap Beban Gempa Siklik

Model Timbunan	Deformasi Maksimum (m)	Pmax (kN/m ²)
Geotekstil Woven	0,002699	81,71
Geotekstil Non-Woven	0,1202	81,13

Perbedaan respons dinamis antara woven dan non-woven berkaitan erat dengan karakteristik tensile strength serta stiffness material perkuatan. Geotekstil woven memiliki struktur anyaman yang lebih rapat sehingga transfer tegangan lateral dapat berlangsung secara lebih efisien selama pembebanan siklik. Kondisi tersebut menyebabkan energi getaran tersebar secara merata dan mengurangi terbentuknya zona deformasi lokal. Penjelasan serupa juga dikemukakan oleh Hayati et al. (2025) yang menegaskan bahwa peningkatan kuat tarik geosintetik memiliki korelasi langsung terhadap peningkatan stabilitas tanah lunak.

Respons dinamis pada model non-woven menunjukkan bahwa permeabilitas tinggi tidak selalu menghasilkan stabilitas maksimum ketika struktur menerima pembebanan berulang. Walaupun kemampuan drainase meningkat, rendahnya modulus tarik menyebabkan lapisan geotekstil lebih mudah mengalami deformasi selama siklus berlangsung. Akumulasi displacement pada area tengah timbunan memperlihatkan bahwa redistribusi tegangan belum berlangsung secara optimal. Temuan tersebut mendukung kajian Zuhri et al. (2020) mengenai pengaruh variasi kondisi tanah terhadap efektivitas sistem perkuatan geosintetik pada tanah lunak.

Pola respons cyclic loading juga memperlihatkan bahwa jumlah siklus gempa memiliki pengaruh langsung terhadap perkembangan deformasi permanen. Pada siklus awal, perubahan displacement masih relatif kecil karena struktur tanah belum mengalami pelemahan internal yang signifikan. Intensitas deformasi mulai meningkat pada siklus menengah ketika regangan plastis terakumulasi dan kekakuan tanah mulai berkurang akibat pengaruh getaran berulang. Karakteristik ini memiliki kesamaan dengan konsep deformasi akibat repeated seismic pulse yang dijelaskan oleh Elfayed (2018) dalam analisis struktur beton terhadap gempa berulang.

Analisis distribusi tegangan pada model reinforced soil menunjukkan bahwa woven geotextile mampu mempertahankan kestabilan sistem meskipun menerima percepatan dinamis tinggi secara terus-menerus. Tegangan horizontal yang berkembang selama cyclic loading dapat direduksi melalui mekanisme penguncian partikel tanah oleh lapisan perkuatan. Interaksi tersebut mengurangi kemungkinan terbentuknya bidang longsor progresif pada area lereng timbunan. Kajian mengenai respons struktur terhadap pengaruh gempa oleh Suharyanto (1994) juga menunjukkan bahwa kestabilan sistem sangat dipengaruhi oleh kemampuan elemen struktur dalam mendistribusikan energi dinamis.

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa pengaruh pembebanan siklik terhadap perilaku tanah tidak hanya ditentukan oleh intensitas percepatan gempa, tetapi juga oleh kemampuan material geosintetik dalam mempertahankan interaksi mekanis dengan tanah dasar. Geotekstil woven menghasilkan respons paling stabil karena mampu menjaga distribusi tegangan dan membatasi perkembangan deformasi selama pembebanan berlangsung. Model non-woven masih memberikan peningkatan kestabilan dibandingkan kondisi tanpa perkuatan, meskipun efektivitasnya lebih rendah pada kondisi gempa berulang dengan amplitudo tinggi. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa desain perkuatan tanah di wilayah seismik perlu mempertimbangkan hubungan antara cyclic loading, tensile stiffness, dan degradasi mekanis material geosintetik secara simultan.

Evaluasi Interaksi Tanah–Geosintetik dan Implikasi Desain Geoteknik pada Wilayah Seismik

Analisis numerik menunjukkan bahwa interaksi antara tanah dan geosintetik memiliki pengaruh dominan terhadap kestabilan sistem timbunan pada kondisi pembebanan dinamis berulang. Lapisan geotekstil berfungsi sebagai elemen transfer tegangan yang menghambat perkembangan regangan plastis pada tanah lunak selama cyclic loading berlangsung. Efektivitas mekanisme tersebut dipengaruhi oleh kekakuan tarik, konfigurasi spacing, dan kemampuan interlock antara tanah dan material perkuatan. Karakteristik ini memiliki kesesuaian dengan konsep soil reinforcement interaction yang dijelaskan oleh Ferreira et al. (2024) pada evaluasi cyclic loading terhadap sistem geogrid.

Pola distribusi tegangan menunjukkan bahwa woven geotextile menghasilkan mekanisme confinement yang lebih stabil dibandingkan non-woven. Struktur anyaman dengan tensile modulus tinggi memungkinkan transfer tegangan horizontal berlangsung lebih merata pada area timbunan. Kondisi tersebut menyebabkan konsentrasi tegangan lokal berkurang sehingga risiko deformasi diferensial dapat ditekan secara signifikan. Temuan ini mendukung penelitian Hayati et al. (2025) yang menyatakan bahwa peningkatan kuat tarik geosintetik berkontribusi langsung terhadap peningkatan performa tanah lunak diperkuat.

Evaluasi terhadap konfigurasi lapisan menunjukkan bahwa jarak vertikal antarperkuatan memengaruhi respons deformasi dan stabilitas internal sistem. Model woven dengan jumlah lapisan lebih sedikit tetap menghasilkan performa lebih baik dibandingkan non-woven karena memiliki kapasitas tensile strength yang lebih tinggi. Distribusi tegangan yang lebih homogen mengurangi perkembangan bidang longsor potensial pada area lereng dan tanah dasar. Kondisi tersebut konsisten dengan observasi Widianti (2012) mengenai hubungan antara jumlah lapisan geosintetik dan peningkatan daya dukung tanah lunak.

Simulasi juga memperlihatkan bahwa deformasi terbesar selalu berkembang pada zona kontak antara timbunan dan tanah dasar lunak. Area tersebut mengalami konsentrasi tegangan vertikal akibat perbedaan modulus elastisitas antar lapisan tanah. Kehadiran geotekstil woven mampu mereduksi ketimpangan deformasi melalui mekanisme redistribusi tegangan yang lebih efektif. Penjelasan serupa ditemukan pada penelitian Indriani (2025) yang menggunakan analisis elemen hingga untuk mengevaluasi perbaikan tanah lunak dengan geotekstil menggunakan PLAXIS.

Interaksi mekanis antara tanah granular dan geosintetik menunjukkan bahwa deformasi lateral dapat ditekan ketika sistem memiliki kemampuan penguncian partikel yang baik. Geotekstil woven menghasilkan kontak gesekan lebih besar sehingga displacement horizontal selama pembebanan dinamis menjadi lebih kecil. Kondisi ini memperlihatkan bahwa mekanisme stabilisasi tidak hanya dipengaruhi oleh kapasitas tarik material, tetapi juga oleh karakteristik interface tanah-geosintetik. Kajian Denine et al. (2022) juga menunjukkan bahwa perilaku tanah granular diperkuat sangat dipengaruhi oleh respons mikrostruktur dan mekanisme friksi internal.

Tabel berikut memperlihatkan hubungan antara jenis geosintetik, jumlah lapisan, dan respons kestabilan sistem selama simulasi dinamis berlangsung. Data numerik menunjukkan bahwa woven geotextile memiliki efisiensi stabilisasi lebih tinggi meskipun menggunakan jumlah lapisan yang lebih sedikit dibandingkan non-woven. Perbedaan tersebut berkaitan dengan kemampuan tensile stiffness dalam mengontrol redistribusi tegangan dan deformasi permanen. Nilai safety factor memperlihatkan kecenderungan peningkatan ketika kapasitas tarik material semakin besar.

Tabel 3. Pengaruh Jenis dan Jumlah Lapisan Geosintetik terhadap Safety Factor dan Respons Stabilitas Tanah Timbunan

Jenis Geosintetik	Jumlah Lapisan	Safety Factor	Karakteristik Respons
Woven	35	1,488	Stabil dan deformasi rendah
Non-Woven	62	1,334	Stabilitas sedang
Tanpa Perkuatan	0	1,272	Deformasi tinggi

Hasil tersebut menunjukkan bahwa efektivitas sistem perkuatan tidak selalu ditentukan oleh jumlah lapisan yang digunakan. Geotekstil non-woven memerlukan jumlah lapisan lebih banyak untuk mencapai stabilitas yang mendekati woven akibat nilai tensile strength yang lebih rendah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa desain perkuatan tanah perlu mempertimbangkan efisiensi material dan respons mekanis jangka panjang secara simultan. Pendekatan serupa dijelaskan oleh Laksono dan Prihatiningsih (2025) dalam evaluasi stabilitas lereng menggunakan geogrid pada tanah lunak.

Pengaruh pembebanan gempa berulang terhadap perilaku tanah juga memperlihatkan adanya penurunan kekakuan sistem secara progresif pada model tanpa perkuatan. Akumulasi regangan plastis menyebabkan redistribusi tegangan menjadi tidak stabil sehingga displacement meningkat pada setiap siklus pembebanan. Kehadiran geosintetik mampu menghambat perkembangan pelemahan tersebut

melalui peningkatan confinement dan transfer gaya tarik. Karakteristik ini memiliki hubungan dengan teori cyclic degradation pada tanah diperkuat yang dikemukakan oleh Zhou et al. (2025).

Kajian terhadap parameter desain menunjukkan bahwa penggunaan geosintetik pada wilayah rawan gempa perlu disesuaikan dengan karakteristik percepatan tanah dan kondisi geologi lokal. Nilai peak ground acceleration sebesar 0,4562 g yang digunakan dalam simulasi menghasilkan respons deformasi yang cukup signifikan pada model tanpa perkuatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pendekatan desain berbasis static stability tidak lagi memadai untuk kawasan dengan aktivitas seismik tinggi. Standar perencanaan ketahanan gempa nasional juga menekankan pentingnya integrasi analisis dinamis pada desain struktur geoteknik di wilayah aktif seismik (Nasional, 2012).

Respons numerik yang diperoleh dari simulasi memperlihatkan bahwa woven geotextile memiliki potensi paling besar untuk diterapkan pada konstruksi timbunan di kawasan rawan gempa karena mampu menjaga kestabilan sistem selama pembebanan siklik berlangsung. Karakteristik tensile stiffness yang tinggi menghasilkan distribusi tegangan lebih terkendali dan mengurangi perkembangan deformasi permanen secara signifikan. Model non-woven tetap memberikan kontribusi terhadap peningkatan kestabilan, terutama pada aspek drainase dan reduksi tekanan air pori, meskipun efektivitas strukturalnya lebih rendah. Pola perilaku tersebut mendukung hasil penelitian Sianturi (2022) dan Nugroho yang menunjukkan bahwa integrasi material geosintetik dalam sistem geoteknik dapat meningkatkan performa stabilitas struktur tanah pada kondisi pembebanan kompleks.

KESIMPULAN

Analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D menunjukkan bahwa siklus beban gempa berulang memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku mekanis tanah timbunan, terutama pada deformasi, redistribusi tegangan, dan kestabilan sistem tanah lunak yang diperkuat geosintetik. Model tanpa perkuatan memperlihatkan akumulasi deformasi vertikal dan lateral yang tinggi akibat rendahnya kapasitas confinement serta berkembangnya konsentrasi tegangan pada zona kontak tanah dasar dan timbunan. Penggunaan geotekstil woven menghasilkan respons paling stabil dengan deformasi maksimum sebesar $2,699 \times 10^{-3}$ m dan safety factor mencapai 1,488 karena memiliki tensile stiffness dan mekanisme interlock yang lebih efektif dalam mendistribusikan tegangan dinamis selama cyclic loading berlangsung. Geotekstil non-woven tetap meningkatkan performa sistem dibandingkan kondisi tanpa perkuatan, namun efektivitasnya lebih rendah akibat kapasitas tarik yang terbatas sehingga deformasi permanen masih berkembang pada area tertentu. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa respons tanah terhadap gempa berulang dipengaruhi secara simultan oleh karakteristik material geosintetik, jumlah siklus pembebanan, konfigurasi spacing vertikal, dan kondisi tanah dasar lunak. Temuan ini menegaskan bahwa desain geoteknik pada wilayah seismik memerlukan pendekatan berbasis analisis dinamis yang mempertimbangkan interaksi tanah–geosintetik secara komprehensif untuk meningkatkan ketahanan dan stabilitas infrastruktur jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Denine, S., Della, N., Benziane, M. M., & Feia, S. (2022). Influence of sample preparation method on static liquefaction behaviour of geotextile reinforced sandy soil. *SN Applied Sciences*, 4(12), 322. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05139-0>.
- Elfayed, R. (2018). Pengaruh Faktor R Dan Gempa Berulang Yang Mengandung Pulse Terhadap Deformasi SRPM Beton Bertulang. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*. <http://dx.doi.org/10.30811/portal.v10i1.998>.
- Ferreira, F. B., Vieira, C. S., de Lurdes Lopes, M., & Ferreira, P. G. (2024). Effects of cyclic loading on soil-geogrid interaction characteristics. *E3S Web of Conferences*, 544, 10005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454410005>.
- Hayati, J., Syuhada, S., & Shahrani, C. (2025). Analisis Pengaruh Kuat Tarik Geosintetik Pada Perkuatan Tanah Lunak Metode Geosynthetic Encased Stone Columns (GESC). *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 82-93. <https://doi.org/10.35334/be.v9i1.32>.
- Indraratna, B., Singh, M., Nguyen, T. T., Rujikiatkamjorn, C., Malisetty, R. S., Arivalagan, J., & Nair, L. (2022). Internal instability and fluidisation of subgrade soil under cyclic loading. *Indian Geotechnical Journal*, 52(5), 1226-1243. <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00616-0>.
- Indriani, L. (2025). Analisis Elemen Hingga Lapisan Tanah Menggunakan Geotekstil Sebagai Metode Perbaikan Tanah Lunak Dengan Software Plaxis: Finite Element Analysis Of Soil Layers Using

- Geotextiles As A Soft Soil Improvement Method With Plaxis Software. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 13(2), 108-118. <https://doi.org/10.33084/mits.v13i2>.
- Laksono, P. A., & Prihatiningsih, A. (2025). Studi Pengaruh Perkuatan Tanah Menggunakan Geogrid Pada Stabilitas Lereng. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 291-298. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i1.33252>.
- Liu, C., Shan, Y., Wang, B., Zhou, S., & Wang, C. (2022). Reinforcement load in geosynthetic-reinforced pile-supported model embankments. *Geotextiles and geomembranes*, 50(6), 1135-1146. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.07.005>.
- Nasional, B. S. (2012). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. *Sni*, 1726, 2012.
- Nugroho, S. A. Variasi Kadar Aspal pada Perkerasan Lentur Diperkuat dengan Geosintetik. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 14(3), 213-223. <https://doi.org/10.14710/mkts.v14i3.3948>.
- Putri, L. D., Hakam, A., Thamrin, R., & Yossyafra, Y. (2025). Analisis Kuat Geser Tanah Kohesif Menggunakan Berbagai Geosintetik. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 23-35. <https://doi.org/10.31849/siklus.v11i1.26906>.
- Ramadhan, A. G., Firmansyah, Y. K., & Farichah, H. (2025). Pengaruh Beban Gempa Terhadap Stabilitas Lereng Dengan Perkuatan Dinding Penahan Tanah Tipe Kantilever. *Konstruksia*, 16(2), 107-117.
- Rizali, M. A. I., & Purwana, Y. M. (2024). Seismic Safety Evaluation of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall for Highway Construction. *Indonesian Geotechnical Journal*, 3(2), 31-46. <https://doi.org/10.56144/igj.v3i2.78>.
- Setiawan, Y., Fathani, T. F., & Faris, F. (2023). Seismic hazard assessment in Maluku Province using PSHA. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 19(2), 223-232. <https://doi.org/10.21831/inersia.v19i2.66790>.
- 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>.
- Sitompul, E. P., & Desiani, A. (2025). Analisis Interaksi Tanah-Geofoam Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 253-262. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i1.31934>.
- Suharyanto, S. (1994). Pengaruh Gempa Terhadap Titik Buhul Portal Struktur Beton Pada Bangunan Gedung Tingkat Tinggi. *Jurnal Fakultas Hukum UII*, 14(23), 30-43. <https://doi.org/10.20885/unisia.v0i23.5410>.
- Vivek. (2024). Effects of cyclic loading on sand overlaying clay model of unpaved roads reinforced with untreated/treated coir geotextiles. *The Journal of The Textile Institute*, 115(9), 1694-1700. <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2261882>.
- Widianti, A. (2012). Pengaruh Jumlah Lapisan dan Spasi Perkuatan Geosintetik terhadap Kuat Dukung dan Penurunan Tanah Lempung Lunak. *Semesta Teknika*, 15(1). <https://doi.org/10.18196/st.v15i1.447>.
- Zhou, L., Sun, R., Chen, J. F., Xia, C. Z., & Wang, H. N. (2025). Effect of geosynthetics reinforcement on seismic behavior of coral sand revetment breakwater subjected to mainshock-aftershock sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190, 109190. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109190>.
- Zuhri, A., Setiawan, B., & Djarwanti, N. (2020). Pengaruh Variasi Muka Air Tanah Pada Timbunan Dengan Perkuatan Geosintetik, Shear Key, Dan Tiang Pancang Di Atas Tanah Lunak. *Matriks Teknik Sipil*, 8(1). <https://doi.org/10.20961/mateksi.v8i1.41532>.