



# Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 2 Desember 2025, Hal. 22-29  
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)  
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

## Analisis Kestabilan Tanah dan Daya Dukung Fondasi pada Pembangunan Infrastruktur di Daerah Rawan Gempa

Buyung Mantap<sup>1\*</sup>, M. Wisridani P.<sup>2</sup>, Parwito<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Universitas Ratu Samban Bengkulu, Indonesia

email: [buyung\\_mantap@yahoo.co.id](mailto:buyung_mantap@yahoo.co.id)

### Article Info :

Received:

15-8-2025

Revised:

10-8-2025

Accepted:

16-10-2025

### Abstract

*Indonesia, as an archipelagic country located at the meeting point of three major tectonic plates, faces enormous challenges in developing infrastructure in earthquake-prone areas. This study analyzes soil stability and foundation bearing capacity as crucial factors in planning earthquake-resistant infrastructure development. The study was conducted using a quantitative approach with secondary data analysis from various infrastructure projects in earthquake-prone areas in Indonesia. The parameters analyzed include soil characteristics, bearing capacity, safety factors, and soil response to seismic loads. The results of the study show that a comprehensive understanding of soil mechanics, the application of appropriate analysis methods, and the selection of suitable foundation types are critical to the success of infrastructure development in earthquake-prone areas. Stability analysis shows that deep foundations such as piles and bored piles are more effective at withstanding earthquake loads than shallow foundations on soft soil. This study recommends the use of soil improvement technology and hybrid foundation systems to increase soil bearing capacity in high seismic zones. These findings make an important contribution to civil engineering practitioners in planning safe and sustainable infrastructure in disaster-prone areas.*

**Keywords:** Soil Stability, Earthquake-Resistant Infrastructure, Geotechnical Analysis, Seismic Zone, Deep Foundations.

### Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama menghadapi tantangan besar dalam pembangunan infrastruktur di daerah rawan gempa. Penelitian ini menganalisis kestabilan tanah dan daya dukung fondasi sebagai faktor krusial dalam perencanaan pembangunan infrastruktur yang tahan gempa. Kajian dilakukan melalui pendekatan kuantitatif dengan analisis data sekunder dari berbagai proyek infrastruktur di wilayah rawan gempa di Indonesia. Parameter yang dianalisis meliputi karakteristik tanah, kapasitas daya dukung, faktor keamanan, dan respons tanah terhadap beban gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemahaman komprehensif terhadap sifat mekanik tanah, penerapan metode analisis yang tepat, dan pemilihan jenis fondasi yang sesuai sangat menentukan keberhasilan pembangunan infrastruktur di daerah rawan gempa. Analisis kestabilan menunjukkan bahwa fondasi dalam seperti tiang pancang dan bored pile lebih efektif menahan beban gempa dibandingkan fondasi dangkal pada tanah lunak. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan teknologi perbaikan tanah dan sistem fondasi hybrid untuk meningkatkan daya dukung tanah di zona seismik tinggi. Temuan ini memberikan kontribusi penting bagi praktisi teknik sipil dalam merencanakan infrastruktur yang aman dan berkelanjutan di wilayah rawan bencana.

**Kata kunci:** Kestabilan Tanah, Infrastruktur Tahan Gempa, Analisis Geoteknik, Zona Seismik, Fondasi Dalam.



©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

Badan Nasional Penanggulangan Bencana mencatat bahwa dalam kurun waktu 2020-2024, Indonesia mengalami lebih dari 1.500 kejadian gempa bumi dengan kekuatan signifikan yang berdampak pada infrastruktur vital. Data Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat menunjukkan bahwa kerusakan infrastruktur akibat gempa bumi mencapai kerugian lebih dari 25 triliun rupiah dalam lima tahun terakhir. Fenomena ini menggarisbawahi urgensi analisis kestabilan tanah dan

daya dukung fondasi yang komprehensif dalam setiap perencanaan pembangunan infrastruktur di wilayah rawan gempa.

Indonesia terletak pada zona pertemuan tiga lempeng tektonik utama yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik yang menjadikan wilayah ini sebagai salah satu daerah dengan aktivitas seismik tertinggi di dunia. Kondisi geologis kompleks ini menimbulkan tantangan khusus dalam perencanaan dan pelaksanaan pembangunan infrastruktur. Keberagaman jenis tanah mulai dari tanah lunak aluvial di dataran rendah hingga tanah keras vulkanik di dataran tinggi memerlukan pendekatan analisis yang berbeda untuk setiap lokasi pembangunan.

Kestabilan tanah dan daya dukung fondasi merupakan dua aspek fundamental yang menentukan keamanan struktur bangunan terhadap beban statis maupun dinamis. Dalam konteks daerah rawan gempa, analisis tidak hanya terbatas pada kondisi pembebanan normal tetapi juga harus mempertimbangkan gaya lateral dan vertikal yang timbul akibat pergerakan tanah saat gempa. Kegagalan fondasi akibat likuifaksi, penurunan tanah berlebihan, atau ketidakmampuan menahan beban gempa telah menyebabkan keruntuhan berbagai struktur infrastruktur penting di Indonesia.

Indonesia menempati posisi yang secara tektonik sangat strategis karena berada pada pertemuan tiga lempeng besar sehingga wilayahnya secara permanen berada dalam kondisi rentan terhadap gempa bumi, dan hal ini menuntut perhatian lebih besar pada aspek rekayasa infrastruktur terutama fondasi dan kestabilan tanah. Kondisi tanah dasar di banyak kawasan rawan gempa sering menunjukkan nilai daya dukung yang bervariasi akibat faktor geologi, kejenuhan air, dan potensi likuifaksi yang meningkat ketika gempa terjadi. Perencanaan pembangunan infrastruktur di zona rawan gempa tidak dapat mengabaikan karakteristik tanah dasar seperti N-SPT, kecepatan gelombang geser ( $V_{s30}$ ), maupun kondisi drainase karena semua itu menentukan efektivitas fondasi yang dirancang (Maharani, 2024).

Secara spesifik, kekhawatiran utama muncul dari fenomena seperti likuifaksi, yang terjadi ketika tanah jenuh air dan berbutir kasar kehilangan kekuatannya akibat tekanan air pori yang naik selama guncangan seismik, dan fenomena ini secara langsung mengurangi daya dukung fondasi dan mengakibatkan penurunan besar atau miringnya struktur (Hutahaean, et al. 2025). Data empiris dari kawasan rawan gempa menunjukkan variasi kondisi tanah dan kebutuhan rekayasa fondasi yang berbeda-beda, sebagai ilustrasi berikut.

**Tabel 1. Kondisi Geoteknik dan Parameter Seismik pada Beberapa Kawasan Rawan Gempa di Indonesia**

| Lokasi Kawasan                               | Parameter                                                       | Nilai                                                      |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Kalurahan Panjangrejo, Kec. Pundong (Bantul) | Persentase lahan kelas sesuai (S1)                              | 53 %                                                       |
|                                              | Persentase lahan kelas kurang sesuai (S2) atau tidak sesuai (N) | 47 %                                                       |
| Kota Palu (Sulawesi Tengah)                  | Nilai percepatan tanah maksimum (PGA)                           | hingga 0,4643 g →<br>Faktor keamanan lereng drop ke ~0,891 |

Sumber: Putri et al. (2022), Ramadhan, et al. (2025)

Tabel tersebut memperlihatkan bahwa meski sebagian besar lahan di kawasan Panjangrejo masih dianggap “sesuai” untuk permukiman, hampir setengah lainnya memiliki kendala yang relevan dengan kondisi gempa dan jarak terhadap sesar aktif. Kasus di Kota Palu menggambarkan bahwa percepatan gempa nyata dapat secara drastis menggerus faktor keamanan fondasi dan stabilitas tanah di lahan yang sebelumnya dianggap cukup aman. Fakta-fakta semacam ini menegaskan bahwa analisis lokal terhadap kondisi tanah dan gaya gempa tidak bisa diabaikan dalam perencanaan infrastuktur.

Dalam perencanaan fondasi pemilihan jenis fondasi (dangkal vs dalam) dan evaluasi daya dukung harus disesuaikan dengan karakteristik tanah dan beban gempa lokal, karena penelitian membuktikan bahwa fondasi dalam seperti tiang pancang atau tiang-raket cenderung lebih unggul dalam mengatasi beban dinamis di tanah labil dibandingkan fondasi dangkal (Elwava, et al. 2025).

Perhatian terhadap aspek kestabilan tanah dan daya dukung fondasi pada pembangunan infrastruktur di daerah rawan gempa bukan sekadar kebijakan teknis melainkan juga investasi keselamatan publik dan keberlanjutan ekonomi, karena kegagalan fondasi akibat gempa dapat menimbulkan kerugian besar baik secara finansial maupun sosial (Rijanta, et al. 2018). Penguatan regulasi dan praktik di lapangan terkait penyelidikan geoteknik, analisis seismik, dan desain fondasi tahan gempa perlu terus ditingkatkan agar target infrastruktur yang aman dan tahan lama dapat tercapai (Undrizon, et al. 2024).

Penelitian ini bertujuan menganalisis parameter kestabilan tanah dan daya dukung fondasi yang kritis dalam pembangunan infrastruktur di daerah rawan gempa. Analisis dilakukan terhadap berbagai aspek meliputi karakteristik mekanik tanah, metode perhitungan daya dukung, faktor keamanan yang diperlukan, dan teknik mitigasi risiko. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi praktisi teknik sipil dalam merencanakan fondasi yang aman dan ekonomis untuk berbagai jenis infrastruktur di wilayah seismik aktif. Urgensi penelitian ini semakin meningkat seiring dengan percepatan pembangunan infrastruktur nasional yang mencakup jalan tol, jembatan, gedung bertingkat tinggi, dan fasilitas publik lainnya yang banyak berlokasi di daerah rawan gempa. Pemahaman mendalam tentang interaksi antara tanah, fondasi, dan beban gempa menjadi kunci keberhasilan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan tahan bencana.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis data sekunder (Qomaruddin, & Sa'diyah, 2024). Data dikumpulkan dari laporan penyelidikan tanah dan dokumentasi proyek infrastruktur di berbagai wilayah rawan gempa di Indonesia yang mencakup Sumatra, Jawa, dan Sulawesi. Periode pengumpulan data meliputi tahun 2020 hingga 2024 untuk memastikan relevansi dengan kondisi terkini dan standar perencanaan yang berlaku. Parameter tanah yang dianalisis meliputi nilai penetrasi standar, kuat geser tanah, modulus elastisitas, kadar air, berat volume, dan parameter dinamis tanah. Data daya dukung fondasi yang dianalisis mencakup fondasi dangkal dan fondasi dalam pada berbagai kondisi tanah dan tingkat seismisitas. Klasifikasi zona gempa mengacu pada peta zonasi gempa Indonesia yang dikeluarkan oleh Pusat Studi Gempa Nasional dengan mempertimbangkan nilai percepatan puncak batuan dasar.

Analisis daya dukung fondasi dilakukan menggunakan metode analitis berdasarkan teori Terzaghi dan modifikasinya serta metode numerik menggunakan perangkat lunak geoteknik (Robbani, & Ikhyia, 2019). Untuk fondasi dalam, kapasitas dukung dihitung menggunakan metode empiris berdasarkan nilai penetrasi standar dan hasil uji beban tiang. Faktor keamanan yang digunakan mengacu pada Standar Nasional Indonesia dan mempertimbangkan tingkat risiko seismik lokasi proyek. Evaluasi stabilitas tanah dilakukan melalui analisis potensi likuifaksi menggunakan metode berbasis tegangan siklis dan metode berbasis energi (Diana, et al. (2024). Parameter masukan untuk analisis meliputi karakteristik gerakan tanah gempa rencana yang diperoleh dari analisis bahaya seismik probabilistik. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi parameter yang paling berpengaruh terhadap kestabilan fondasi pada kondisi gempa. Validasi hasil analisis dilakukan dengan membandingkan prediksi daya dukung dengan hasil uji beban lapangan dan kinerja aktual fondasi pada beberapa proyek yang telah mengalami gempa. Data kinerja fondasi saat gempa dikumpulkan melalui studi pustaka dan laporan evaluasi pascagempa dari berbagai sumber. Triangulasi data dilakukan untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil penelitian.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Karakteristik Tanah pada Zona Seismik Tinggi serta Kapasitas Daya Dukung Fondasi**

Analisis terhadap 45 lokasi proyek infrastruktur di daerah rawan gempa menunjukkan keragaman karakteristik tanah yang signifikan. Sebanyak 62 persen lokasi didominasi oleh tanah aluvial dengan nilai penetrasi standar rendah hingga sedang, 28 persen merupakan tanah vulkanik dengan kepadatan tinggi, dan 10 persen berupa tanah residual dengan karakteristik khusus. Distribusi jenis tanah ini sangat mempengaruhi strategi perencanaan fondasi yang optimal untuk setiap lokasi (Wihasiti, & Pramono, 2025).

Hasil pengujian parameter dinamis tanah menunjukkan bahwa kecepatan rambat gelombang geser pada tanah aluvial berkisar antara 120 hingga 250 meter per detik, yang termasuk dalam kategori kelas situs tanah lunak hingga sedang menurut klasifikasi standar. Tanah vulkanik menunjukkan

kecepatan gelombang geser yang lebih tinggi yaitu 350 hingga 550 meter per detik. Perbedaan karakteristik dinamis ini berdampak langsung pada amplifikasi gempa lokal dan beban gempa yang harus ditahan oleh fondasi. Evaluasi potensi likuifaksi dilakukan pada 28 lokasi dengan tanah aluvial yang memiliki kedalaman muka air tanah kurang dari 10 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa 18 lokasi memiliki potensi likuifaksi sedang hingga tinggi dengan faktor keamanan terhadap likuifaksi kurang dari 1,5. Kondisi ini memerlukan perhatian khusus dalam perencanaan fondasi, baik melalui pemilihan jenis fondasi yang tepat maupun penerapan teknik perbaikan tanah sebelum konstruksi.

Untuk memperjelas perbedaan karakteristik dinamis dan potensi likuifaksi yang ditemukan pada studi lapangan, ringkasan numerik berikut disusun sebagai penguat hasil pengujian dan evaluasi potensi, di mana tabel memuat rentang  $V_s$  pada tiap kelas tanah yang diamati serta jumlah lokasi yang dievaluasi untuk likuifaksi; tabel ini mengkonsolidasikan temuan lapangan studi ini dengan referensi data  $V_s$  regional untuk keperluan verifikasi.

**Tabel 2. Karakteristik Geoteknik Tanah dan Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data  $V_s$  dan Kondisi Lapangan di Indonesia**

| Parameter yang Diukur         | Kategori / Lokasi                  | Nilai / Jumlah                                                  | Sumber verifikasi                                                                                                          |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V_s$ (tanah aluvial)         | $V_s$ range                        | 120–250 m/s                                                     | Atlas $V_s30$ & studi regional                                                                                             |
| $V_s$ (tanah vulkanik)        | $V_s$ range                        | 350–550 m/s                                                     | Studi $V_s$ regional dan publikasi teknik                                                                                  |
| Lokasi diuji untuk likuifaksi | Jumlah lokasi aluvial (GWL < 10 m) | 28 lokasi diuji; 18 lokasi potensial menengah-tinggi (FS < 1,5) | Analisis likuifaksi menggunakan metode SPT/CPT (Idriss–Boulanger dan LPI) seperti pada studi kasus Kulonprogo dan lainnya. |

Sumber: Cipta (2025), Wijayanto et al. (2022), Oktafiani, & Sasmayaputra (2025)

Data pada Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran parameter geoteknik utama yang relevan terhadap kestabilan tanah di wilayah rawan gempa. Tabel ini menyoroti dua kategori tanah, yaitu tanah aluvial dan tanah vulkanik, serta lokasi-lokasi yang diuji untuk potensi likuifaksi. Pada tanah aluvial, nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) berada pada rentang 120–250 m/s, yang dikategorikan sebagai tanah lunak hingga sedang. Data ini diverifikasi menggunakan *Atlas  $V_s30$*  dan berbagai studi regional. Sementara itu, pada tanah vulkanik, nilai  $V_s$  lebih tinggi, yaitu 350–550 m/s, menunjukkan kepadatan dan kekuatan geser yang lebih besar, dengan sumber verifikasi berasal dari studi  $V_s$  regional serta publikasi teknik geoteknik di Indonesia.

Terdapat 28 lokasi tanah aluvial dengan kedalaman muka air tanah (GWL < 10 meter) yang diuji untuk potensi likuifaksi. Dari jumlah tersebut, 18 lokasi menunjukkan potensi likuifaksi menengah hingga tinggi dengan faktor keamanan (FS) < 1,5. Evaluasi dilakukan menggunakan metode SPT/CPT berdasarkan pendekatan Idriss–Boulanger dan LPI, seperti yang diterapkan pada beberapa studi kasus di Kulonprogo dan daerah sejenisnya.

Evaluasi potensi likuifaksi pada 28 lokasi aluvial dengan kedalaman muka air tanah kurang dari 10 meter menunjukkan bahwa 18 lokasi memiliki faktor keamanan terhadap likuifaksi kurang dari 1,5 sehingga dikategorikan berpotensi sedang hingga tinggi, dan kondisi ini memunculkan kebutuhan nyata untuk menerapkan teknik perbaikan tanah, seperti penggantian tanah, pemadatan dinamik, pemasangan kolom batu (stone columns), atau drainase sub-permukaan untuk menurunkan tekanan air pori selama guncangan; analisis likuifaksi yang digunakan mengikuti prosedur baku yang memanfaatkan data SPT/CPT dan kurva CRR–CSR sehingga hasil dapat dibandingkan dengan studi sebelumnya (Rahman, et al. 2020). Dari sisi desain fondasi lokasi dengan potensi likuifaksi tinggi umumnya tidak layak menggunakan fondasi dangkal tanpa perlakuan dan lebih menguntungkan secara teknis maupun ekonomis untuk menerapkan fondasi tiang atau solusi perkuatan dasar, aspek ekonomi dan kelayakan pelaksanaan perbaikan tanah harus dianalisis bersama-sama dengan pertimbangan fungsi struktur, karena pilihan teknik mitigasi harus seimbang antara efektivitas teknis dan biaya; rekomendasi proyek awal pada lokasi-lokasi ini adalah melakukan uji lapangan tambahan dan analisis numerik dinamika tanah-struktur untuk memvalidasi opsi mitigasi yang dipilih

Perhitungan daya dukung fondasi dangkal pada berbagai jenis tanah menunjukkan variasi yang luas tergantung pada karakteristik tanah setempat. Untuk fondasi menerus pada tanah pasir padat, daya dukung ultimit berkisar antara 450 hingga 650 kilopascal dengan faktor keamanan 3,0 untuk beban statis. Pada tanah lempung keras, nilai daya dukung ultimit berkisar antara 300 hingga 450 kilopascal. Namun untuk kondisi beban gempa, nilai daya dukung ini mengalami reduksi sekitar 25 hingga 35 persen tergantung pada intensitas gempa rencana dan durasi pembebanan.

Untuk fondasi dalam, analisis kapasitas dukung tiang pancang tunggal dengan diameter 600 milimeter dan kedalaman penetrasi 25 meter menunjukkan kapasitas dukung ultimit berkisar antara 2.500 hingga 4.000 kilonewton pada tanah berlapis. Tahanan gesek selimut memberikan kontribusi 60 hingga 75 persen dari total kapasitas dukung pada tanah lempung, sedangkan pada tanah pasir kontribusi tahanan ujung menjadi lebih dominan mencapai 50 hingga 60 persen. Pemahaman terhadap distribusi daya dukung ini penting untuk optimasi desain fondasi dan efisiensi biaya konstruksi.

**Tabel 3. Daya Dukung Fondasi pada Berbagai Jenis Tanah dan Kondisi Gempa**

| Jenis Fondasi   | Jenis Tanah    | Daya Dukung Ultimit<br>(kPa/kN) | Reduksi Akibat<br>Gempa (%) |
|-----------------|----------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Fondasi Dangkal | Pasir Padat    | 450-650                         | 25-30                       |
| Fondasi Dangkal | Lempung Keras  | 300-450                         | 30-35                       |
| Tiang Pancang   | Tanah Berlapis | 2500-4000                       | 15-20                       |
| Bored Pile      | Lempung Lunak  | 1800-3200                       | 20-25                       |

Sumber: Hasil Analisis Data Penelitian, 2024

Tabel 3 memberikan gambaran mengenai variasi kemampuan tanah dalam menahan beban fondasi serta sejauh mana nilai daya dukung tersebut menurun akibat pengaruh gempa. Berdasarkan data, terlihat bahwa fondasi dangkal pada tanah pasir padat memiliki daya dukung ultimit tertinggi di antara jenis fondasi dangkal, yakni berkisar 450–650 kPa, dengan penurunan kapasitas akibat gempa sebesar 25–30 %, yang menunjukkan bahwa meskipun tanah pasir padat memiliki kepadatan tinggi, efek gempa tetap menyebabkan degradasi kekuatan geser yang signifikan. Fondasi dangkal di atas lempung keras memiliki daya dukung lebih rendah, 300–450 kPa, dengan redaman akibat gempa 30–35 %, memperlihatkan bahwa tanah berbutir halus lebih sensitif terhadap peningkatan tekanan air pori selama guncangan.

Pada fondasi dalam, tiang pancang pada tanah berlapis menunjukkan performa terbaik dengan daya dukung ultimit mencapai 2 500–4 000 kPa dan penurunan kapasitas hanya 15–20 %, menandakan efektivitas transfer beban ke lapisan tanah keras di kedalaman yang lebih stabil secara seismik. Sementara itu, fondasi bored pile pada lempung lunak memiliki kisaran daya dukung 1 800–3 200 kPa dengan penurunan akibat gempa 20–25 %, yang masih cukup baik tetapi menunjukkan potensi kehilangan kekuatan karena deformasi plastis pada tanah lunak saat gempa terjadi.

Adanya korelasi langsung antara jenis tanah, tipe fondasi, dan tingkat reduksi daya dukung akibat gempa, di mana fondasi dalam cenderung lebih tahan terhadap pengaruh dinamis dibandingkan fondasi dangkal. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan jenis fondasi yang sesuai dengan karakteristik tanah dan tingkat risiko seismik di lokasi proyek untuk menjamin stabilitas struktur.

### Analisis Kestabilan dan Faktor Keamanan

Evaluasi faktor keamanan fondasi pada kondisi pembebanan normal dan gempa menunjukkan penurunan yang signifikan saat terjadi gempa. Untuk fondasi dangkal pada tanah pasir padat, faktor keamanan turun dari 3,2 pada kondisi statis menjadi 2,1 pada kondisi gempa dengan percepatan puncak tanah 0,3 gravitasi. Penurunan faktor keamanan yang lebih drastis terjadi pada tanah lempung lunak dimana nilai turun dari 2,8 menjadi 1,6, menunjukkan margin keamanan yang terbatas pada kondisi gempa kuat.

Analisis stabilitas lereng dengan metode pseudo-statik pada 12 lokasi proyek jalan di daerah perbukitan menunjukkan bahwa koefisien gempa horizontal 0,15 hingga 0,25 gravitasi dapat mengurangi faktor keamanan lereng hingga 30-40 persen. Beberapa lereng yang awalnya stabil dengan faktor keamanan di atas 1,5 pada kondisi statis menjadi kritis dengan faktor keamanan mendekati 1,0

saat terjadi gempa. Kondisi ini memerlukan penerapan perkuatan lereng seperti dinding penahan tanah, ankur tanah, atau soil nailing untuk mempertahankan stabilitas pada kondisi gempa (Sari, 2024).

Penurunan fondasi akibat konsolidasi tanah dan densifikasi siklis juga dianalisis untuk berbagai jenis fondasi. Fondasi dangkal pada tanah lempung terkonsolidasi normal menunjukkan penurunan total berkisar antara 50 hingga 150 milimeter selama umur rencana 50 tahun dengan kontribusi penurunan sekunder mencapai 30-40 persen. Pada tanah pasir lepas yang mengalami densifikasi akibat gempa, penurunan mendadak dapat mencapai 20-40 milimeter per kejadian gempa kuat. Penurunan diferensial yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktural yang serius (Pardosi, 2023).

Kapasitas lateral fondasi dalam sangat penting untuk menahan gaya gempa yang bekerja pada struktur. Analisis respons lateral kelompok tiang pancang menunjukkan bahwa defleksi lateral kepala tiang dapat mencapai 25-40 milimeter pada gempa dengan periode ulang 500 tahun. Momen maksimum yang terjadi pada tiang umumnya berada pada kedalaman 2-4 diameter tiang di bawah permukaan tanah. Penulangan tiang harus dirancang dengan mempertimbangkan momen maksimum ini untuk mencegah kegagalan struktural tiang saat gempa.

### **Strategi Mitigasi dan Rekomendasi Desain**

Berdasarkan hasil analisis, beberapa strategi mitigasi dapat diterapkan untuk meningkatkan kestabilan fondasi di daerah rawan gempa. Pertama, pemilihan jenis fondasi harus disesuaikan dengan kondisi tanah lokal dan tingkat seismisitas. Untuk tanah lunak dengan potensi likuifaksi tinggi, fondasi dalam yang menembus lapisan likuifaksi dan mencapai lapisan keras di bawahnya merupakan pilihan yang lebih aman. Fondasi tiang pancang dengan diameter besar atau kelompok bored pile dapat memberikan kapasitas dukung dan kekakuan lateral yang memadai (Fatriady, et al. 2022).

Kedua, teknik perbaikan tanah dapat diterapkan untuk meningkatkan karakteristik tanah sebelum konstruksi fondasi. Metode pemadatan dinamis efektif untuk meningkatkan kepadatan tanah pasir lepas hingga kedalaman 8-12 meter. Untuk tanah yang lebih dalam, metode kolom pasir atau kolom kerikil dapat digunakan untuk meningkatkan drainase dan mengurangi potensi likuifaksi. Injeksi semen atau grouting kimia dapat diaplikasikan untuk meningkatkan kohesi tanah lempung lunak dan mengurangi penurunan konsolidasi.

Ketiga, penggunaan sistem fondasi hybrid dapat menjadi solusi yang ekonomis dan efektif untuk bangunan dengan beban sedang. Fondasi rakit yang dikombinasikan dengan beberapa tiang pancang strategis dapat mendistribusikan beban dengan lebih baik dan mengurangi penurunan diferensial. Sistem ini juga memberikan redundansi struktural dimana jika beberapa tiang mengalami degradasi kapasitas akibat gempa, fondasi rakit masih dapat mendukung sebagian beban struktur.

Keempat, penerapan konsep desain berbasis kinerja perlu dipertimbangkan untuk struktur penting seperti rumah sakit, pusat data, dan infrastruktur kritis lainnya. Pendekatan ini memungkinkan perencanaan fondasi yang mempertimbangkan tingkat kerusakan yang dapat diterima untuk berbagai level gempa. Fondasi dapat dirancang untuk tetap berfungsi dengan kerusakan minimal pada gempa dengan probabilitas kejadian tinggi, sambil memastikan tidak terjadi keruntuhan pada gempa maksimum yang dapat terjadi di lokasi tersebut.

Kelima, pemantauan dan instrumentasi fondasi selama dan setelah konstruksi sangat penting untuk memvalidasi asumsi desain dan mendeteksi potensi masalah sejak dini. Pemasangan piezometer untuk memantau tekanan air pori, inklinometer untuk mengukur pergerakan lateral, dan settlement plate untuk mengukur penurunan dapat memberikan informasi berharga tentang perilaku aktual fondasi. Data pemantauan juga dapat digunakan untuk mengkalibrasi model numerik dan meningkatkan akurasi prediksi untuk proyek di masa mendatang.

### **KESIMPULAN**

Penelitian ini menegaskan bahwa kestabilan tanah dan daya dukung fondasi pada wilayah rawan gempa sangat dipengaruhi oleh karakteristik geoteknik dan kondisi dinamis tanah. Sebagian besar wilayah seismik di Indonesia didominasi oleh tanah aluvial yang rentan terhadap likuifaksi, dengan reduksi daya dukung fondasi mencapai 25-35 persen pada fondasi dangkal dan 15-25 persen pada fondasi dalam selama gempa. Fondasi dalam seperti tiang pancang dan bored pile terbukti lebih andal menahan beban vertikal maupun gaya lateral, sementara faktor keamanan fondasi dapat turun hingga 40 persen tergantung intensitas gempa dan kondisi tanah. Hal ini menuntut penerapan standar desain yang memperhitungkan klasifikasi situs dan variabilitas parameter tanah secara cermat.

Strategi mitigasi risiko seperti perbaikan tanah, penggunaan fondasi hybrid, dan penerapan desain berbasis kinerja dinilai efektif untuk meningkatkan keandalan struktur di wilayah seismik aktif. Teknik seperti pemadatan dinamis, kolom pasir, dan grouting terbukti meningkatkan daya dukung serta menurunkan potensi likuifaksi. Untuk mendukung perencanaan yang lebih adaptif, penelitian ini merekomendasikan pengembangan basis data karakteristik tanah nasional, peningkatan kompetensi praktisi teknik melalui pelatihan standar perencanaan gempa, serta penerapan sistem pemantauan kinerja fondasi pascagempa sebagai upaya menuju praktik rekayasa geoteknik yang lebih tangguh dan berkelanjutan di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Cipta, A. (2025). Generating Indonesian-wide Vs30 Map Using Engineering Geomorphology Approach. *Indonesian Journal on Geoscience*, 12(2), 217-229. <https://doi.org/10.17014/ijog.12.2.217-229>.
- Diana, N. A., Soemitro, R. A. A., Ekaputri, J. J., Satrya, T. R., & Warnana, D. D. (2024). Evaluasi Risiko Likuifaksi Berdasarkan Karakteristik Ukuran Butir Tanah dan Hasil Tahanan Standart Penetration test (N-SPT) Studi kasus Bandara Yogyakarta Internasional Airport. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 6(1), 51-58. <https://doi.org/10.26740/proteksi.v6n1.p51-58>.
- Elwava, A. H., Putri, D. R., & Zahir, L. A. (2025). Perbandingan Kinerja Pada Pondasi Dangkal Dan Pondasi Dalam Pada Bangunan Di Daerah Rawan Gempa. *Jurnal Daktilitas*, 5(1), 35-39. <https://doi.org/10.36563/daktilitas.v5i1.1647>.
- Fatriady, M. R., Rachman, M. R., Jamal, M., Muliawan, I. W., Mustika, W., & Mabui, D. S. S. (2022). *Teknologi Bangunan dan Material*. Tohar Media.
- Hutahaean, W. Z., Mafiroh, S., & Wijanarko, D. (2025). Pengaruh Pondasi Tiang Pancang Terhadap Likuifaksi Tanah Pasir Jenuh Air. *Jurnal Daktilitas*, 5(1), 17-20. <https://doi.org/10.36563/daktilitas.v5i1.1642>.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2021). Pedoman teknis bangunan tahan gempa. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Maharani, I. A. (2024). Analisis Potensi Likuifaksi dan Daya Dukung Fondasi Tanah Berdasarkan Data n-Spt (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Gedung Informatika Politeknik Negri Cilacap). *Tesis*, Universitas Islam Sultan Agung.
- Oktafiani, P. G., & Sasmayaputra, N. A. (2025). Assessment Probability of Soil Liquefaction Potential Based on SPT Data with NovoLIQ Application. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 21(1), 145-154. <https://doi.org/10.21831/inersia.v21i1.78664>.
- Pardosi, R. (2023). *Uji Konsolidasi Pada Tanah Lempung Dengan Campuran Bahan Kimia Asam Fosfat* (Doctoral dissertation, Universitas Medan Area).
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2021). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2021. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Putri, F. J. R., Prasetya, J. D., & Santoso, D. H. (2022). Evaluasi daya dukung lahan permukiman rawan bencana gempabumi Panjangrejo, Pundong, Bantul, DIY. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 159-168. <https://doi.org/10.36813/jplb.6.3.159-168>.
- Qomaruddin, Q., & Sa'diyah, H. (2024). Kajian teoritis tentang teknik analisis data dalam penelitian kualitatif: Perspektif Spradley, Miles dan Huberman. *Journal of Management, Accounting, and Administration*, 1(2), 77-84. <https://doi.org/10.52620/jomaa.v1i2.93>.
- Rahman, M. A., Fathani, T. F., Rifa'i, A., & Hidayat, M. S. (2020). Analisis tingkat potensi likuifaksi di kawasan underpass yogyakarta international airport. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 16(2), 91-104. <https://doi.org/10.25077/jrs.16.2.91-104.2020>.
- 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. <https://doi.org/10.24853/jk.16.2.107-117>.
- Rijanta, R., Hizbaron, D. R., & Baiquni, M. (2018). *Modal Sosial Dalam Manajemen Bencana*. UGM Press.
- Robbani, E. A., & Ikhyia, I. (2019). Analisis Daya Dukung Fondasi Dangkal Menggunakan Metode Numerik dan Analitik pada Tanah Lempung Lunak yang Diperkuat dengan Granular

- Trench. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 5(4), 41.  
<https://doi.org/10.26760/rekaracana.v5i4.41>.
- Sari, S. D. A. (2024). *Analisis Stabilitas Lereng Timbunan Pada Badan Jalan Dengan Perkuatan Geotekstil Menggunakan Program Plaxis 22* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- Undrizon, U., Yuhelson, Y., & Prasetyo, D. A. (2024). Efektivitas Perlindungan Hukum terhadap Pembangunan Infrastruktur dalam Mendukung Industri Strategis untuk Kesejahteraan Nasional. *Jurnal Sosial Teknologi*, 4(6), 305-316.  
<https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v4i6.1262>.
- Wihasti, I. S., & Pramono, R. W. D. (2025). Tipologi dan distribusi spasial bidang tanah dalam struktur perkotaan: Studi kasus Kota Denpasar. *Tunas Agraria*, 8(2), 268-289.  
<https://doi.org/10.31292/jta.v8i2.447>.
- Wijayanto, D. M., Daryono, U. N., & Muh Aris Marfai, B. S. (2022). Characteristics and Spatial Distribution of Vs30 Based on Microtremor Inversion and MASW Data through Landform Unit in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 49(6).  
<https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.49.6.15>.