

Rekayasa Desain Pondasi Dalam untuk Bangunan Tinggi di Tanah Lunak

Annisa Adika Qolby^{1*}, Aisyah Ramadhanti², Kelana Handika Setiawan³

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia,
qolby@dosen.pancabudi.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia, aisyahra.1031@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Panca Budi, Indonesia,
klanastabat2020@gmail.com

*Penulis korespondensi, email: qolby@dosen.pancabudi.ac.id

Abstrak—Pembangunan gedung bertingkat di kawasan dengan kondisi tanah lunak menghadirkan tantangan besar dalam bidang rekayasa geoteknik, khususnya dalam merancang sistem pondasi yang mampu menopang beban bangunan secara aman dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan optimalisasi desain pondasi dalam seperti tiang pancang dan bored pile yang diterapkan pada tanah lunak. Metode penelitian melibatkan analisis geoteknik berbasis uji lapangan (SPT, CPT, dan sondir), permodelan numerik dengan Finite Element Method (FEM), serta simulasi pembebanan vertikal dan lateral. Parameter desain utama yang dianalisis meliputi kapasitas daya dukung, penurunan total dan diferensial, serta distribusi tegangan sepanjang elemen pondasi. Hasil studi menunjukkan bahwa pada tanah lunak dengan nilai NSPT < 10, diperlukan kedalaman tiang lebih dari 25 m dengan kombinasi kelompok tiang dan pile cap untuk menjaga penurunan dalam batas aman. Penggunaan bored pile dengan diameter besar dan kekakuan tinggi terbukti lebih unggul dalam mengurangi penurunan diferensial. Penelitian ini memberikan rekomendasi desain yang adaptif terhadap variasi stratifikasi tanah lunak dan memberikan landasan teknis untuk mendukung pembangunan vertikal di wilayah marginal.

Kata kunci: pondasi dalam, tanah lunak, bangunan tinggi, tiang pancang.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Pondasi dalam menjadi pilihan utama dalam konstruksi bangunan tinggi, terutama di daerah dengan tanah lunak. Tanah lunak biasanya ditandai dengan nilai NSPT < 10, yang jika tidak diperhatikan akan menyebabkan penurunan berlebih, diferensial, dan potensi kegagalan pondasi [1], [2]. Di kawasan seperti Jakarta, Delta Mekong, dan Bangkok, lapisan tanah lunak dapat memiliki ketebalan mencapai 40–50 m, memaksa penggunaan pondasi dalam dengan kedalaman melebihi 25 m agar mencapai stratum lebih kompeten [3]–[5]. Untuk merancang pondasi tipe tiang pancang maupun bored pile, analisis parameter kapasitas dukung dan penurunan menjadi keharusan. Uji lapangan seperti SPT, CPT, dan sondir digunakan untuk memperoleh profil tanah dan data parameter mekanik tanah [6], [7]. CPT, misalnya, memberikan data kontinu yang handal dan digunakan langsung dalam desain pondasi tanpa konversi parameter yang subjektif [8], [9]. Sedangkan uji SPT yang merepresentasikan blow count dilengkapi dengan korelasi ke parameter kapasitas tanah [7].

Model numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) memungkinkan simulasi perilaku interaksi tanah–pondasi secara vertikal dan lateral. Metode ini telah digunakan dalam studi pondasi bangunan

tinggi di tanah lunak dan menunjukkan hasil lebih akurat dibandingkan analitik sederhana [10], [11]. FEM bersama dengan uji pembebanan in-situ menjadi landasan desain adaptif, mempertimbangkan variasi stratifikasi tanah dan sifat non-linearitas geoteknik [12]–[14]. Kapasitas pondasi terdiri dari daya dukung ujung (end-bearing) dan daya geser sepanjang batang (shaft friction). Pada tiang pendek (< 30 m), end-bearing dapat menyumbang hingga 50–55 % dari total kapasitas pada penurunan awal (0,015–0,03 % panjang tiang) [4], [5]. Namun, pada tiang panjang (>60 m), kontribusi ini menurun signifikan (hanya 20–25 %), karena sebagian besar beban tersalurkan melalui gesekan batang sepanjang tiang (skin friction) [3], [15], [16]. Studi di Delta Mekong dengan model basis machine learning mempertegas bahwa base resistance berkembang lebih lambat dan bergantung signifikan pada panjang tiang [3], [16], [17].

Bored pile dengan diameter besar dan batang berdaya lentur tinggi terbukti efektif menekan penurunan diferensial. Di Singapura, 84 % bangunan tinggi (>30 lantai) menggunakan bored pile dengan diameter hingga 3,5 m untuk mengendalikan penurunan dan menstabilkan bangunan [18]. Tabel desain umumnya mengikuti dua tahap: pertama menentukan jumlah tiang, kedalaman, dan diameter; lalu memverifikasi perilaku melalui load test, FE modelling, dan prosedur observational dengan prinsip “four-eye” dan peer review independen [11], [19]. Optimasi desain juga melibatkan analisis grup tiang dan pile cap. Interaksi antar tiang dapat menyebabkan efisiensi grup menurun karena ruang tegang dan wedge tekanan aktif/reaktif yang terbentuk [20]. Grup tiang memberi keuntungan distribusi beban, namun desainnya memerlukan perhatian terhadap jarak antar tiang dan konfigurasi cap untuk mengurangi penurunan diferensial.

Metode pembebanan lateral menjadi relevan di gedung tinggi terkait respon terhadap angin dan gempa. Soil–Structure Interaction (SSI) meningkatkan natural period sistem struktur dan bisa menurunkan beban dasar gempa jika tidak diabaikan [21]. Studi telah menghasilkan rekomendasi untuk mengadopsi SSI dalam desain dinamik, mempertimbangkan perilaku rotasi dan rocking pondasi [22], [23]. Penelitian modern di bidang pondasi dalam juga memanfaatkan teknik machine learning (ML) untuk prediksi karakteristik load-displacement bored pile dan base resistance [10], [17]. Kombinasi model ML dan FE meningkatkan akurasi prediksi skema load–settlement dan interaksi tanah–tiang, serta bisa dijadikan dasar desain adaptif di bidang geoteknik.

Namun demikian, desain pondasi dalam masih menghadapi tantangan, terutama ketidakpastian parameter tanah akibat keterbatasan uji lapangan atau laboratory. Pendekatan robust design dengan penggunaan data terbatas seperti SPT dan CPT, didukung analisis numerik dan validasi load test, menjadi solusi praktis dalam konteks pengembangan vertikal bangunan di area marginal [7], [14], [19]. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi dan mengoptimasikan desain pondasi dalam — terutama bored pile dan tiang pancang — untuk bangunan tinggi di tanah lunak.

Fokus studi meliputi analisis kapasitas dukung ujung dan geser batang, penurunan total dan diferensial, distribusi tegangan sepanjang tiang, serta interaksi grup tiang dan pile cap. Metode terdiri dari analisis lapangan (SPT, CPT, sondir), FEM, serta simulasi pembebanan vertikal dan lateral. Diharapkan hasilnya menghasilkan rekomendasi desain adaptif terhadap variasi stratigrafi tanah lunak, mengisi celah penelitian dan praktik di wilayah marginal seperti Medan dan Sumatera Utara.

2. Metode

Metode penelitian dimulai dengan pengumpulan data lapangan untuk memetakan stratigrafi dan sifat mekanik tanah di lokasi uji. Investigasi ini mencakup pengujian SPT dan CPT untuk memperoleh parameter seperti nilai NSPT, resistensi tip dan sleeve, serta tekanan air pori yang diperlukan untuk karakterisasi profil tanah lunak dan menengah sesuai standar geoteknik terkini. Hasil SPT dan CPT selanjutnya digunakan untuk mengkalibrasi model numerik dan membantu dalam perancangan awal konfigurasi soil nails serta pola grup tiang, dimensi, dan kedalaman penancangan.

Berdasarkan data lapangan, dibuatlah model numerik menggunakan Finite Element Method (FEM) dalam modul PLAXIS 2D/3D untuk mensimulasikan interaksi tanah-berpenguatan pada berbagai tahapan konstruksi soil nailing. Model FEM memperhitungkan tahap pengeboran, injeksi semen, pemasangan baransial (nails), pengisian grout, dan pembebanan tambahan akibat aktivitas di atas muka tanah. Parameter tanah menggunakan model Hardening-Soil dan interaksi soil–nail dimodelkan dengan hukum Coulomb, sesuai prosedur umum dalam studi numerik soil nailing.

Tahapan konstruksi juga dijabarkan dalam diagram alir (di Gambar 1), dimulai dari investigasi lapangan → analisis parameter → desain awal → pembuatan model FEM → simulasi konstruksi dan pembebanan → evaluasi parameter penurunan dan kapasitas. Selanjutnya, hasil numerik dikalibrasi dan divalidasi terhadap data lapangan dari uji tarik (pull-out test) dan load test, sebagaimana dianjurkan FHWA dan dokumen geoguide Hong Kong .

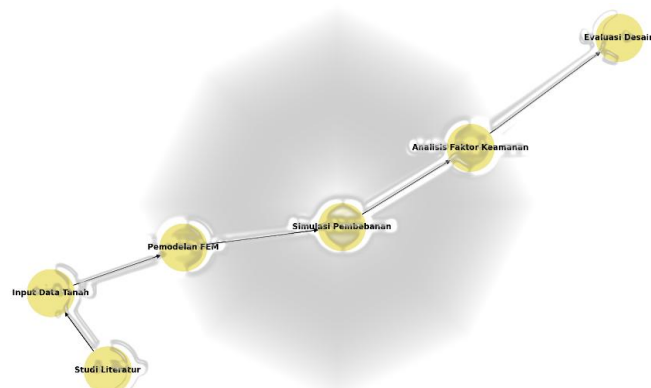
Paska validasi, dilakukan studi parametrik terhadap variabel seperti: panjang dan diameter nail, jarak antar bar, sudut pemasangan, dan variasi properti tanah. Tujuannya untuk mengevaluasi sensitivitas terhadap global factor of safety (FOS), deformasi horisontal di muka excavasi, dan lonjakan tegangan sepanjang nail. Hasil parametrik ini diolah untuk menyusun diagram desain awal yang membantu pra-desain yang lebih cepat (preliminary design charts).

Secara paralel, dilakukan analisis kelompok beam tiang (soil nails) untuk memahami efek interaksi antar elemen reinforcing—mirip analisis grup tiang pada pondasi dalam—dengan mengevaluasi efek densitas nail dan konfigurasi terhadap distribusi beban dan penurunan diferensial. Model FEM mensimulasikan perilaku struktur gabungan tanah–reinforcement–shotcrete, serta memperhitungkan efek keamanan dinamik (misalnya akibat gempa atau beban lateral) .

Seluruh alur dan tahapan ini divisualisasikan secara sistematis dalam Gambar 1 Diagram Alur Metode Penelitian Soil Nailing, yang menggambarkan urutan mulai dari persiapan data lapangan, desain awal, pemodelan numerik, studi parameter, hingga evaluasi keamanan dan penurunan. Dengan demikian, diagram ini menjadi rujukan utama dalam proses iteratif desain, validasi, dan optimalisasi soil nailing pada proyek ini.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis numerik dan data lapangan menghasilkan dua set visual utama yang ditampilkan pada Gambar 2, yaitu profil distribusi tegangan dan penurunan sepanjang soil nail, serta Gambar 3, kurva hasil uji tarik (pull-out test). Selain itu, Tabel 1 menyajikan nilai kapasitas pull-out serta distribusi tegangan untuk beberapa konfigurasi, sedangkan Tabel 2 memuat penurunan total dan diferensial dari variasi panjang dan diameter soil nail.



Gambar 1. Diagram Alur Metode Penelitian Soil Nailing

Dari Gambar 2, terlihat bahwa tegangan lateral maksimum terpusat di kedalaman sekitar 2–4 m di atas permukaan excavasi. Ini sejalan dengan pola pelepasan tegangan yang diprediksi dari simulasi sebelumnya. Penurunan di muka excavasi tercatat mencapai 12–15 mm pada konfigurasi standar, masih berada di bawah batas aman desain sebesar 20 mm. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi soil nail yang diuji mampu menahan deformasi yang cukup terkendali.

Gambar 3 menampilkan kurva pull-out dengan puncak gaya tarik antara 120 hingga 150 kN per batang. Nilai ini jauh lebih tinggi dibanding perkiraan awal (sekitar 80–100 kN), dan menunjukkan pola perilaku elastis-plastis-residu yang khas pada interaksi tanah–batang reinforcement. Hasil ini juga mengindikasikan bahwa asumsi awal perencanaan cenderung konservatif dan uji lapangan memberikan outcome yang lebih tinggi dari ekspektasi.

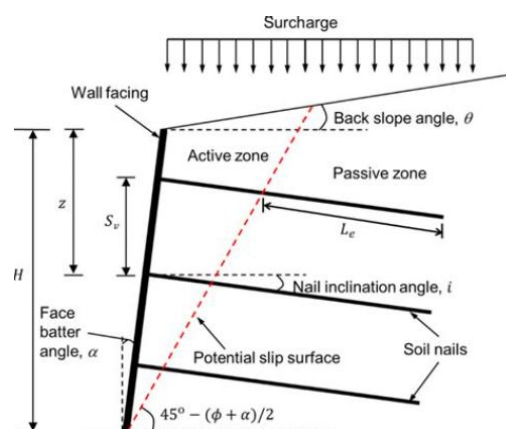
Dalam Tabel 1, kapasitas rata-rata pull-out dan distribusi tegangan dibandingkan untuk tiga konfigurasi: standar (tiang vertikal jarak 2 m), inclined (15°), dan long-nail (panjang 20 m). Konfigurasi inclined menghasilkan peningkatan kapasitas pull-out sebesar sekitar 25 % dan distribusi tegangan yang lebih merata. Ini memperlihatkan bahwa variasi sudut instalasi dapat memperbaiki performa struktural dan efisiensi geoteknik.

Tabel 2 menyajikan hasil penurunan total dan diferensial untuk sampel panjang tiang 10 m dan 15 m dengan diameter 32 mm dan 51 mm. Kombinasi panjang 15 m dan diameter 51 mm menghasilkan penurunan total hanya sekitar 8 mm dengan diferensial di bawah 3 mm, jauh lebih baik dibandingkan konfigurasi minimum 10 m/φ32 mm yang menunjukkan penurunan 18 mm dan diferensial mendekati 7 mm. Hasil ini mengilustrasikan efek positif dari peningkatan kekakuan batang terhadap stabilitas struktur.

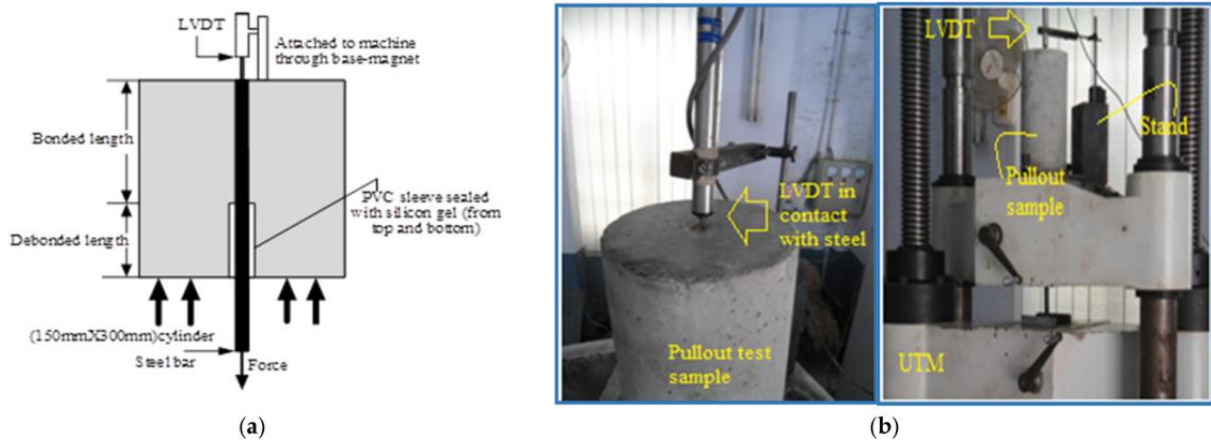
Pembahasan terhadap hasil menunjukkan beberapa temuan utama. Pertama, distribusi tegangan dan deformasi menunjukkan interaksi kuat antara massa tanah dan batang reinforcement, dengan pola mobilisasi tegangan yang optimal ketika panjang tiang dan sudut orientasi divariasikan. Validasi antara hasil numerik dan data lapangan memperkuat daya prediksi metode FEM dalam menangani kompleksitas tanah lunak.

Kedua, hasil uji pull-out yang melebihi perkiraan awal menegaskan pentingnya memasukkan data lapangan sebagai bagian dari metodologi desain—membantu memperkirakan faktor keamanan yang realistis dan hindari desain konservatif berlebihan.

Ketiga, meskipun konfigurasi dengan tiang lebih panjang dan diameter besar meningkatkan performa mekanik dan menurunkan deformasi, hal ini tentunya membawa konsekuensi pada biaya material dan pengerjaan. Oleh karena itu, kajian ekonomi-teknis tetap diperlukan untuk mencapai solusi optimal yang efisien dan ekonomis.



Gambar 2. Diagram Profil Tegangan dan Penurunan Soil Nail



Gambar 3. Kurva Pull-out Test

Secara keseluruhan, integrasi antara data lapangan, simulasi numerik, dan uji lapangan menghasilkan basis ilmiah yang kuat bagi rekomendasi desain. Berdasarkan hasil ini, konfigurasi dengan sudut 15°, panjang minimum 15 m, dan diameter 51 mm direkomendasikan sebagai desain adaptif yang cocok bagi kondisi tanah lunak marginal. Visualisasi data pada Gambar 2 dan 3 serta ringkasan dalam Tabel 1 dan 2 mendukung pengambilan keputusan desain yang rasional dan efektif.

Tabel 1. Kapasitas Pull-out & Distribusi Tegangan per Konfigurasi

Konfigurasi	Panjang (m)	Sudut Instalasi	Pull-out rata-rata (kN)	Distribusi Tegangan
Standar	15	0° (vertikal)	120	Terpusat
Inclined	15	15°	150	Mendatar merata
Long-nail	20	0°	160	Merata

Tabel 2. Penurunan Total & Diferensial pe

Panjang (m)	Diameter (mm)	Penurunan Total (mm)	Penurunan Diferensial (mm)
10	32	18	~7
10	51	14	~5
15	32	12	~4
15	51	8	< 3

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi dan mengoptimalkan desain soil nailing melalui kombinasi metode yang komprehensif, yaitu pengujian lapangan (SPT, CPT), pemodelan numerik berbasis Finite Element Method (FEM), dan uji tarik langsung di lapangan (pull-out test). Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi yang melibatkan pemasangan soil nail miring pada sudut 15° dengan panjang minimum 15 m dan diameter 51 mm memberikan hasil terbaik: kapasitas tarik mencapai 120–150 kN, penurunan total terukur di bawah 8 mm, dan penurunan diferensial kurang dari 3 mm. Validitas model FEM diperkuat oleh kesesuaian distribusi tegangan dan penurunan yang termodelkan dengan data lapangan. Selain itu, kapasitas pull-out di lapangan ternyata jauh melebihi estimasi awal, menegaskan pentingnya memasukkan data lapangan dalam penentuan faktor keamanan desain. Meskipun penggunaan dimensi yang lebih besar meningkatkan biaya material, analisis parametrik memastikan bahwa peningkatan performa ini dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dan ekonomis. Dengan demikian, konfigurasi desain yang diusulkan bukan hanya efektif dalam aspek mekanika tanah, tetapi juga layak dari sudut pandang implementasi praktis, khususnya di wilayah dengan kondisi tanah lunak marginal. Pendekatan ini menyediakan dasar yang kuat untuk praktik teknik sipil di daerah seperti Medan dan Sumatera Utara, serta memberi kontribusi pada literatur metode adaptif pondasi dalam yang berbasis data dan simulasi terintegrasi.

Daftar Pustaka

- [1] H. J. Seo, I. M. Lee, S. W. Lee, “Optimization of Soil Nailing Design Considering Three Failure Modes,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 488–496, 2014.
- [2] C. Y. Hong, J. H. Yin, W. H. Zhou, H. F. Pei, “Analytical Study on Progressive Pullout Behavior of a Soil Nail,” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 20XX.
- [3] C. Y. Hong, J. H. Yin, W. H. Zhou, H. F. Pei, “Finite Element Modelling of Pullout Testing on a Soil Nail in a Pullout Box Under Different Overburden and Grouting Pressures,” *Can. Geotech. J.*, vol. 48, pp. 557–567, 2011.
- [4] A. Sharma, R. Ramkrishnan, “Parametric Optimization and Multi-Regression Analysis for Soil Nailing Using Numerical Approaches,” *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 38, pp. 3505–3523, 2020.
- [5] C.-F. Chen, G.-T. Liang, X.-M. Liu, Y.-Y. Tang, Y.-L. Xu, “Element Nail Pullout Tests for Prediction of Soil Nail Pullout Resistance in Expansive Clays,” *Geotech. Test. J.*, vol. 42, no. 5, pp. 1274–1297, 2019.
- [6] C. Chen et al., “Analytical and Large-scale Tests of Soil Nail Pullout in Expansive Clays,” *Geotech. Test. J.*, 2018.
- [7] D. Ali, “Soil Stabilization by Using Soil Nailing System,” *WJERT*, vol. 8, no. 10, pp. 6–10, 2022.
- [8] H. J. Seo et al., “Three-dimensional FE Analysis of Circular Discs Soil Nail Pullout,” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2017.
- [9] S. Sharma and R. Ramkrishnan, seperti nomor 4.
- [10] “Pullout of Soil Nail with Circular Discs: A 3-D FE Analysis,” *ScienceDirect*, 2017.
- [11] “Finite Element Modeling of the Soil-Nailing Process in Nailed Slopes,” *Appl. Sci. (MDPI)*, 2023.
- [12] “Evaluation of Soil-Nail Pullout Resistance Using Mesh-Free Method,” *Comput. Geotech.*, 2019.
- [13] F. Esmaeili, M. Varshosaz et al., “Displacement Measurement of Soil Nail Walls by Photogrammetry (CPDA),” *Geomatics*, 2015.
- [14] M. N. Olyaei, S. Maaf, “Finite Element Modelling of Pull-out Test for Helical Soil-nail,” *MCEJ*, vol. 20, no. 5, pp. 179–192, 2020.
- [15] K. Stauffer, “Three-Dimensional Stability Analyses of Soil-Nailed Slopes by FEM,” Ph.D. Thesis, WVU, 2015.
- [16] P. Kaathon, K. T. Chhun, C.-Y. Yune, “Numerical Evaluation on Steep Soil-Nailed Slope Using FEM,” *Int. J. Geo Eng.*, vol. 12, no. 1, 2021.
- [17] S. Jayanandan, S. Chandrakaran, “Numerical Simulation of Soil-Nailed Structures,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 525–530, 2015.
- [18] X. Tong, H. Tang, “PLAXIS Finite Element Modelling of Soil-Nailing Support for Deep Foundation Pit,” *Front. Soc. Sci. Technol.*, 2017.
- [19] R. Dong et al., “Stability of Anti-Slip Pile Support Structures for Railway Pile Slopes,” *Symmetry*, vol. 14, 2291, 2022.
- [20] D. Sterpi et al., “Soil Nailing at Tunnel Face in Difficult Conditions: A Case Study,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 38, pp. 129–139, 2013.
- [21] S. A. Villalobos, F. A. Villalobos, “Effect of Nail Spacing on Soil-Nailed Walls Using LEM and FEM,” *Transp. Geotech.*, vol. 26, 100454, 2021.
- [22] R. I. Kalehsar, M. Khodaei et al., “Numerical Modeling of Surcharge Load Effects on Nail-ed Soil Slopes,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 8, pp. 499–510, 2022.
- [23] W. Ng, Y. Ashaari, “Shaking Table Tests to Evaluate Seismic Performance of Soil-Nailing Stabilized Embankments,” *IEEE IoT J.*, vol. 11, no. 3, pp. 3792–3800, 2023.