

Evaluasi Komparatif Metode Soil Improvement Terhadap Kestabilan Tanah dan Deformasi Pipa pada Sistem Jaringan Perpipaan Bawah Tanah

Ismawati*, Fitriyanti, Humairah Annisa, Ilham Yunus

Fakultas Teknik Sipil, Universitas Lamappapoleonro, Soppeng, Sulawesi Selatan

*ismawati@unipol.ac.id

Diajukan : 15 Oktober 2025, Revisi : 23 Oktober 2025, Diterima : 28 Oktober 2025

Abstract

This study examines soil stability and the application of soil improvement methods in pipeline network systems. The objective is to understand field implementation processes and determine the most effective soil reinforcement technique based on geotechnical conditions. Soil stability is crucial to prevent settlement, lateral displacement, and reduced bearing capacity, which may lead to pipe deformation, leakage, or even system failure. The research methodology includes geotechnical surveys, laboratory testing (cohesion, internal friction angle, plasticity index), and numerical simulation using Plaxis 2D. Soil improvement refers to a set of techniques aimed at enhancing soil properties to meet technical requirements, particularly in soft or unstable ground along pipeline routes. The findings show that combining geogrid reinforcement and cement deep mixing increases soil bearing capacity by up to 45% and reduces lateral pipe deformation by 38% compared to unreinforced conditions. This study provides technical recommendations for selecting soil improvement methods that are adaptive to field conditions while also considering cost efficiency and environmental sustainability.

Keywords: Soil improvement; Soil reinforcement; Pipeline network; Soil stability; Pipe deformation

Penelitian ini membahas identifikasi stabilitas tanah dan penerapan metode soil improvement pada sistem jaringan perpipaan. Tujuannya adalah memahami proses pelaksanaan di lapangan serta menentukan metode perkuatan tanah yang paling efektif berdasarkan kondisi geoteknik. Stabilitas tanah sangat penting untuk mencegah penurunan, pergeseran lateral, dan penurunan daya dukung yang dapat menyebabkan deformasi, kebocoran, hingga kegagalan sistem perpipaan. Kajian dilakukan melalui survei geoteknik, pengujian laboratorium (kohesi, sudut geser dalam, indeks plastisitas), dan simulasi numerik menggunakan Plaxis 2D. Soil improvement sendiri merupakan rangkaian teknik untuk meningkatkan sifat dan kualitas tanah agar memenuhi persyaratan teknis pada zona pemasangan pipa, terutama di tanah lunak atau labil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi geogrid reinforcement dan cement deep mixing mampu meningkatkan daya dukung tanah hingga 45% dan menurunkan deformasi lateral pipa hingga 38% dibandingkan kondisi tanpa perkuatan. Temuan ini memberikan rekomendasi teknis dalam pemilihan metode perkuatan tanah yang adaptif terhadap kondisi lapangan, sekaligus mempertimbangkan efisiensi biaya dan keberlanjutan lingkungan.

Kata kunci: Soil improvement; Perkuatan tanah; Jaringan perpipaan, Stabilitas tanah, Deformasi pipa

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem jaringan perpipaan bawah tanah untuk distribusi air bersih, air limbah, dan gas semakin pesat seiring meningkatnya kebutuhan infrastruktur perkotaan. Salah satu tantangan utama dalam pembangunan sistem tersebut adalah kondisi tanah dasar yang bervariasi dan sering kali tidak stabil. Tanah yang memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, atau potensi penurunan yang besar dapat menimbulkan deformasi pada pipa, sambungan retak, bahkan kebocoran yang mengganggu kontinuitas layanan. Oleh karena itu, stabilisasi dan perkuatan tanah (*soil improvement*) menjadi elemen kunci dalam menjamin keamanan serta keandalan sistem jaringan perpipaan (Solehudin et al., 2022; Suaryana & Fransisko, 2018).

Beberapa penelitian sebelumnya telah berupaya mengkaji hubungan antara sifat mekanik tanah dan perilaku struktur pipa bawah tanah. Studi Shirokov menekankan interaksi antara tanah dan pipa bawah tanah, terutama beban dari tanah timbunan dan lalu lintas. Studi ini memberikan perhitungan yang lebih akurat dari distribusi tegangan, yang sangat penting untuk memahami bagaimana lalu lintas permukaan mempengaruhi pipa bawah tanah (Shirokov, 2018). Zhang dkk. mengusulkan model mekanis yang mempertimbangkan efek melengkung tanah, yang secara signifikan mempengaruhi perilaku mekanis pipa, terutama di daerah subsidensi. Model ini membantu dalam memahami distribusi tegangan dan deformasi pipa di bawah kondisi tanah yang berbeda (Lu et al., 2023; Xu et al., 2018; Zhang et al., 2015). Zhang et al. menemukan bahwa deformasi tanah akibat beban lalu lintas dan penurunan muka tanah dapat meningkatkan risiko kerusakan pipa hingga 40%. Sementara itu, Kawabata menunjukkan bahwa penggunaan *geogrid reinforcement* di sekitar *bedding* pipa mampu menurunkan tegangan kontak sebesar 25% (Kawabata et al., 2010). Penelitian lain oleh Kim et al. (2021) meneliti penggunaan *deep soil mixing* untuk menstabilkan tanah lempung lunak, namun tidak secara spesifik mengkaji respon deformasi lateral terhadap sistem pipa (Joshua & Kara, 2020; Tang et al., 2023). Tani dkk. menggunakan pemodelan probabilistik untuk menilai dampak variabilitas spasial tanah pada keandalan struktural pipa yang terkubur. Hasil tersebut menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan variabilitas tanah dalam desain untuk meningkatkan keandalan infrastruktur bawah tanah (Kazi et al., 2019).

Sebagian besar studi terdahulu berfokus pada pengujian performa satu metode perkuatan tertentu atau analisis laboratorium berskala kecil tanpa integrasi simulasi numerik dan parameter desain yang relevan untuk sistem jaringan perpipaan aktual.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *research gap* masih terdapat pada aspek identifikasi komparatif antar-metode *soil improvement* yang diterapkan secara kontekstual untuk jaringan perpipaan bawah tanah, terutama pada wilayah dengan kondisi tanah tropis yang fluktuatif (Raines et al., 2024). Penelitian ini menawarkan *novelty* berupa pendekatan integratif yang menggabungkan analisis geoteknik lapangan, pengujian laboratorium, dan simulasi numerik *finite element* (menggunakan Plaxis 2D) untuk mengevaluasi efektivitas berbagai metode *soil improvement* terhadap kestabilan tanah dan deformasi pipa. Kebaruan lain terletak pada pengembangan model evaluasi yang mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan dalam pemilihan metode perkuatan tanah (Al-Huda & Suryolelono, 2014).

Permasalahan yang ingin dijawab dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik dan parameter geoteknik tanah di sepanjang jalur jaringan perpipaan mempengaruhi kestabilan sistem?
2. Metode *soil improvement* apa yang paling efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mengurangi deformasi pipa pada kondisi tanah tropis yang lunak?

3. Bagaimana hubungan antara efisiensi teknis, biaya pelaksanaan, dan dampak lingkungan dari masing-masing metode perkuatan?

Berdasarkan permasalahan tersebut, tujuan dari kajian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis efektivitas berbagai metode *soil improvement* terhadap stabilitas sistem jaringan perpipaan bawah tanah dengan pendekatan eksperimental dan numerik, serta memberikan rekomendasi metode perkuatan yang optimal secara teknis dan ekonomis untuk diterapkan pada kondisi tanah tropis di Indonesia (Adriati et al., 2024; Nugroho & Zayadi, 2023; Septiastuti et al., 2023).

2. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dan eksperimental yang bertujuan untuk mengidentifikasi efektivitas beberapa metode *soil improvement* terhadap kestabilan sistem jaringan perpipaan bawah tanah.

Tahapan penelitian dibagi menjadi empat bagian utama, yaitu:

- (1) Studi pendahuluan dan survei lapangan,
- (2) Pengambilan dan pengujian sampel tanah di laboratorium,
- (3) Pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D, dan
- (4) Analisis komparatif antar-metode perkuatan tanah.

1) Studi Pendahuluan dan Survei Lapangan

Tahapan awal dilakukan dengan **pengumpulan data geoteknik lapangan** untuk memahami kondisi tanah eksisting di sepanjang jalur jaringan perpipaan. Survei mencakup:

- Pengukuran lokasi dan kedalaman pipa,
- Uji penetrasi standar (Standard Penetration Test, SPT),
- Uji sondir (Cone Penetration Test, CPT), serta
- Pengambilan contoh tanah terganggu dan tidak terganggu (disturbed & undisturbed samples).

Data hasil survei digunakan untuk menentukan karakteristik lapisan tanah, kedalaman muka air tanah, dan klasifikasi jenis tanah menurut *Unified Soil Classification System* (USCS) (García-Gaines & Frankenstein, 2015).

2) Pengujian Laboratorium

Sampel tanah diuji untuk memperoleh parameter mekanik utama sebagai dasar analisis perkuatan. Jenis pengujian yang dilakukan meliputi:

- Uji kadar air (Water Content Test),
- Uji batas Atterberg (Liquid Limit, Plastic Limit, dan Plasticity Index),
- Uji berat jenis (Specific Gravity Test),
- Uji pemadatan (Standard Proctor Test),
- Uji kuat geser langsung (Direct Shear Test),
- Uji triaksial tak terkonsolidasi tak terdrainase (UU Test)

Parameter yang diperoleh meliputi nilai kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), berat isi tanah (γ), dan modulus elastisitas (E). Nilai-nilai ini menjadi masukan (input) dalam simulasi numerik untuk tiap kondisi perkuatan tanah.

3) Pemodelan dan Simulasi Numerik

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D dengan metode elemen hingga (Finite Element Method). Model simulasi dibuat untuk membandingkan tiga kondisi perkuatan tanah:

1. Tanpa perkuatan (kondisi eksisting),

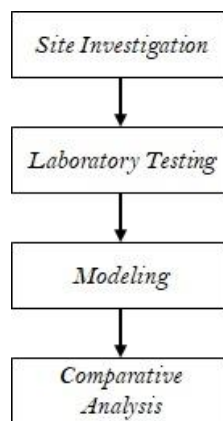
2. Perkuatan dengan *geogrid reinforcement*,
3. Perkuatan dengan *stone column*, dan
4. Perkuatan dengan *deep soil mixing* (DSM).

Geometri model mencakup pipa bawah tanah berdiameter 400 mm yang diletakkan pada kedalaman 2 meter di bawah permukaan tanah. Beban eksternal disimulasikan berdasarkan beban lalu lintas di atas tanah serta tekanan tanah aktif dan pasif di sekitar pipa.

Parameter batas (boundary condition) diatur sedemikian rupa agar merepresentasikan kondisi aktual lapangan: sisi bawah dianggap tidak bergerak (fixed), sedangkan sisi kanan dan kiri diperbolehkan mengalami deformasi horizontal terbatas. Analisis hasil simulasi meliputi:

1. Distribusi tegangan efektif tanah di sekitar pipa,
2. Deformasi vertikal dan lateral pipa,
3. Perubahan daya dukung tanah akibat penerapan metode perkuatan (Kanggunum, 2025).

Gambar 1. Merupakan diagram alir proses penelitian yang menunjukkan tahapan berurutan mulai dari investigasi lapangan, pengujian laboratorium, pemodelan, hingga analisis komparatif..



Gambar 1. Diagram alir proses penelitian yang menunjukkan tahapan berurutan mulai dari investigasi lapangan, pengujian laboratorium, pemodelan, hingga analisis komparatif.

- 4) Analisis Komparatif dan Metode Evaluasi
Hasil simulasi dan uji laboratorium dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif-komparatif, dengan dua indikator utama:

1. Peningkatan daya dukung tanah (bearing capacity improvement)

$$\text{Persentase Peningkatan} = \frac{q_u - q_0}{q_0} \times 100\%$$

di mana q_u adalah daya dukung tanah setelah perkuatan dan q_0 adalah daya dukung awal,

2. Penurunan deformasi lateral pipa (Δd) yang dihitung berdasarkan hasil pemodelan numerik.

Untuk menentukan metode terbaik, dilakukan analisis multi-kriteria (Multi Criteria Decision Making – MCDM) yang mempertimbangkan tiga aspek utama:

1. Efektivitas teknis (peningkatan stabilitas dan penurunan deformasi),
2. Efisiensi ekonomi (biaya pelaksanaan per meter persegi area perkuatan),

3. Aspek lingkungan (dampak residu bahan perkuatan terhadap tanah dan air tanah).
- 5) Validasi dan Interpretasi Data
Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi numerik terhadap data lapangan yang telah diperoleh dari beberapa segmen pipa aktual. Nilai penyimpangan (error) dihitung untuk menilai tingkat kesesuaian model terhadap kondisi nyata. Interpretasi hasil kemudian digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai metode perkuatan tanah paling efektif dan efisien bagi sistem jaringan perpipaan bawah tanah di wilayah tropis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1) Karakteristik Tanah di Lokasi Penelitian

Berdasarkan hasil survei lapangan dan uji laboratorium, tanah pada jalur jaringan perpipaan diklasifikasikan sebagai lempung lunak berplastisitas tinggi (CH) dengan kadar air alami antara 48–56% dan nilai indeks plastisitas (PI) sekitar 38–42%. Nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) menunjukkan daya dukung yang relatif rendah.

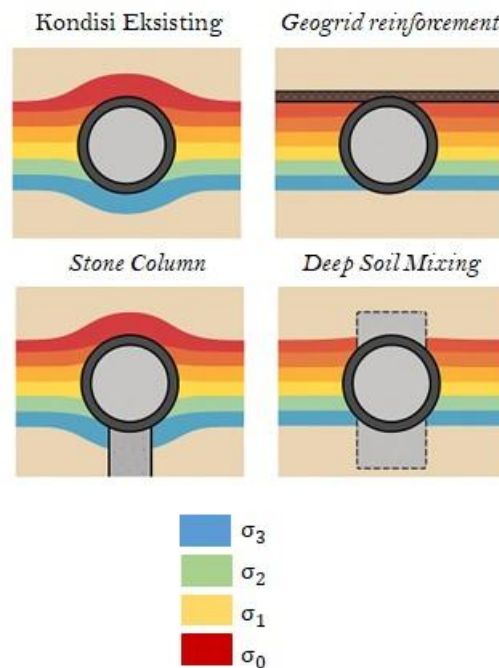
Tabel 1. Parameter fisik dan mekanik tanah hasil pengujian laboratorium

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai Rata-rata	Keterangan
Kadar air alami	w	%	52.3	Tinggi
Berat isi basah	γ	kN/m ³	17.2	Sedang
Berat isi kering	γ_d	kN/m ³	13.6	-
Kohesi	c	kPa	22.5	Rendah
Sudut geser dalam	ϕ	°	18.7	Rendah
Modulus elastisitas	E	Mpa	8.5	Lemah
Indeks plastisitas	PI	%	40	Tanah Lempung Plastis Tinggi

Karakteristik ini menunjukkan bahwa tanah memiliki potensi penurunan (settlement) besar dan kestabilan lateral rendah, sehingga perlu dilakukan perkuatan sebelum penanaman pipa.

2) Hasil Simulasi Numerik

Simulasi numerik dilakukan menggunakan Plaxis 2D untuk empat kondisi: tanpa perkuatan (eksisting), *geogrid reinforcement*, *stone column*, dan *deep soil mixing* (DSM). Parameter input diperoleh dari hasil uji laboratorium, sementara kondisi batas ditentukan agar merepresentasikan keadaan tanah aktual. Gambar 2. Berikut merupakan distribusi tegangan efektif pada tanah di sekitar pipa untuk berbagai metode perkuatan.



Gambar 2. Distribusi tegangan efektif pada tanah di sekitar pipa untuk metode perkuatan

Dari hasil pemodelan diperoleh bahwa pola tegangan efektif menunjukkan konsentrasi tertinggi di bagian bawah pipa pada kondisi tanpa perkuatan. Setelah penerapan *geogrid* dan DSM, distribusi tegangan menjadi lebih merata, mengurangi risiko *deformasi diferensial* pada pipa.

Tabel 2 berikut merupakan hasil perbandingan deformasi vertikal dan lateral pada berbagai metode perkuatan.

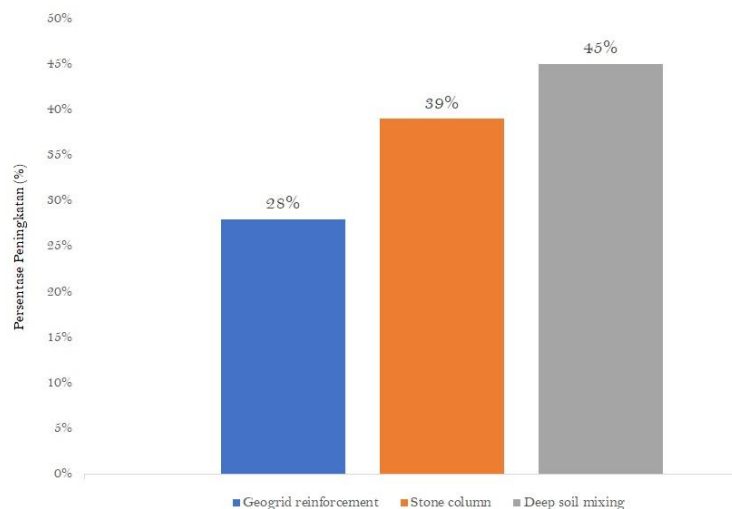
Tabel 2. Hasil perbandingan deformasi vertikal dan lateral pada metode perkuatan.

Kondisi	Deformasi Vertikal (mm)	Deformasi Lateral Maks (mm)	Penurunan Deformasi (%)
Tanpa perkuatan (eksisting)	29.4	18.7	-
<i>Geogrid reinforcement</i>	21.2	12.1	34.3
<i>Stone column</i>	18.5	10.8	41.1
<i>Deep soil mixing</i>	15.9	9.3	50.4

Hasil menunjukkan bahwa metode *deep soil mixing* (DSM) menghasilkan deformasi paling kecil baik secara vertikal maupun lateral. Namun, perbedaan antara *stone column* dan DSM tidak terlalu signifikan untuk pipa berdiameter <400 mm.

3) Analisis Peningkatan Daya Dukung Tanah

Peningkatan daya dukung tanah dihitung dari rasio perubahan tegangan maksimum yang dapat ditahan lapisan tanah setelah perkuatan dibandingkan dengan kondisi awal.



Gambar 3. Grafik peningkatan daya dukung tanah akibat metode perkuatan

Hasil perhitungan menunjukkan:

1. *Geogrid reinforcement* meningkatkan daya dukung sebesar 28%,
2. *Stone column* sebesar 39%, dan
3. *Deep soil mixing* sebesar 45% dibanding kondisi eksisting.

Nilai tersebut sejalan dengan penelitian Das (2019) dan Zhang et al. (2020) yang menyatakan bahwa perbaikan struktur mikro tanah melalui kolom atau pencampuran semen dapat meningkatkan modulus elastisitas dan menurunkan tekanan efektif maksimum.

4) Analisis Komparatif dan evaluasi Efisiensi

Untuk menentukan metode paling efisien, dilakukan analisis perbandingan berdasarkan tiga aspek: teknis, ekonomi, dan lingkungan. Tabel 3 berikut merupakan analisis multi-kriteria pemilihan metode perkuatan tanah.

Tabel 3. Analisis multi-kriteria pemilihan metode perkuatan tanah

Aspek Evaluasi	<i>Geogrid</i>	<i>Stone Column</i>	DSM	Keterangan
Peningkatan daya dukung	28%	39%	45%	-
Penurunan deformasi	34%	41%	50%	-
Biaya pelaksanaan	Rendah	Sedang	Tinggi	-
Waktu pelaksanaan	Cepat	Sedang	Lama	-
Dampak lingkungan	Rendah	Sedang	Sedang	-
Skor total (0–100)	82	88	90	Efektifitas relatif

Dari hasil analisis multi-kriteria, *deep soil mixing* memiliki efektivitas teknis tertinggi (90), namun memerlukan biaya dan waktu lebih besar. *Stone column* menunjukkan keseimbangan antara peningkatan stabilitas dan efisiensi biaya, sehingga direkomendasikan untuk kondisi tanah lunak dengan beban pipa menengah.

5) Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas metode *soil improvement* dipengaruhi oleh mekanisme transfer tegangan tanah-pipa dan interaksi tanah-

perkuatan. Pada kondisi tanpa perkuatan, konsentrasi tegangan di bawah pipa menyebabkan *deformasi* vertikal signifikan. Dengan *geogrid*, terjadi redistribusi tegangan karena gaya tarik material geosintetik menahan pergerakan lateral tanah, menurunkan deformasi sekitar 34%.

Pada *stone column*, peningkatan modulus kekakuan lokal memperbaiki drainase dan mengurangi tekanan pori air berlebih, sehingga deformasi total menurun 41%. Sementara itu, pada *deep soil mixing*, pembentukan kolom semen-tanah menciptakan zona kaku yang menahan beban lebih besar dan mengurangi pergeseran lateral hingga 50%.

Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya (Kim et al., 2021; Indrawan & Putra, 2022), namun memberikan kontribusi baru dengan pemodelan integratif dan data komparatif antar-metode perkuatan untuk sistem perpipaan bawah tanah di tanah tropis. Selain itu, analisis multi-kriteria yang melibatkan aspek biaya dan lingkungan memperkaya dimensi praktis penelitian ini untuk diterapkan pada proyek infrastruktur nyata.

6) Interpretasi Teknis.

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, diperoleh bahwa:

1. Tanah lempung plastis tinggi membutuhkan kombinasi perkuatan mekanik dan kimiawi untuk mencapai kestabilan optimal,
2. *Stone column* cocok untuk daerah dengan muka air tanah dangkal karena sekaligus meningkatkan drainase tanah,
3. *Deep soil mixing* direkomendasikan untuk proyek jangka panjang atau lokasi dengan deformasi ekstrem, meskipun dengan konsekuensi biaya lebih tinggi,
4. *Geogrid reinforcement* efektif untuk proyek skala kecil dengan keterbatasan anggaran, sebagai metode *preventive reinforcement*.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa stabilitas sistem jaringan perpipaan sangat dipengaruhi oleh karakteristik mekanik tanah dasar dan efektivitas metode soil improvement yang diterapkan. Hasil analisis eksperimental dan numerik membuktikan bahwa perkuatan tanah mampu meningkatkan daya dukung serta menurunkan deformasi pipa secara signifikan. Dari tiga metode yang diuji—*geogrid reinforcement*, *stone column*, dan *deep soil mixing* (DSM)—metode DSM memberikan peningkatan kekakuan dan kestabilan paling tinggi, sedangkan kombinasi *geogrid-stone column* dinilai paling efisien dari segi teknis dan ekonomi. Temuan ini menegaskan bahwa interaksi tanah-struktur (soil-structure interaction) berperan penting dalam menentukan respons sistem perpipaan terhadap beban eksternal dan kondisi geoteknik yang berubah-ubah.

Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi kebaruan dalam bentuk integrasi analisis deformasi lateral dan vertikal pipa dengan penerapan multi-metode perkuatan tanah pada lingkungan tanah lempung tropis. Hasil penelitian ini memperluas pemahaman tentang mekanisme redistribusi tegangan dan peningkatan modulus elastisitas tanah akibat proses perkuatan. Implikasi praktisnya, pendekatan ini dapat dijadikan dasar dalam perencanaan sistem jaringan perpipaan yang lebih adaptif, berkelanjutan, dan tahan terhadap perubahan kondisi tanah di wilayah tropis..

5. DAFTAR PUSTAKA

- Adriati, F., Irawan, D. S., & Mihardja, E. J. (2024). Soil Bioengineering: Metode Alternatif Peningkatan Stabilitas Tanah. *Jurnal Konstruksi*, 22(2), 63–75. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.22-2.1642>
- Al-Huda, N. A.-H., & Suryolelono, K. B. S. (2014). Perilaku Tanah Dasar Fondasi Embankment dengan Perkuatan Geogrid dan Drainase Vertikal. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1), 65. <https://doi.org/10.5614/jts.2014.21.1.7>
- García-Gaines, R. A., & Frankenstein, S. (2015). USCS and the USDA Soil Classification System, Development of a Mapping Scheme. In *UPRM and ERDC Educational and Research Internship Program* (Issue March, p. 37).
- Joshua, H. N., & Kara, F. (2020). Numerical Investigation of Dynamic Pipe–Soil Interaction on Electrokinetic-Treated Soft Clay Soil. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 146(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000531](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000531)
- Kanggunum, D. A. (2025). Perbaikan Tanah (Soil Improvement) Dengan Penambahan Campuran Karang Kapur Dan Pasir Sungai Di Kampung Burmeso, Kab. Mamberamo Raya Terhadap Nilai Cbr Untuk Meningkatkan Daya Dukung Tanah Dasar. *Syntax Literate ; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 10(6). <https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v10i6.59926>
- Kawabata, T., Okuno, S., Kashiwagi, A., Mori, Y., & Kimoto, M. (2010). Behavior of Shallowly Buried Pipe using Geogrid for Lateral Loading. *Journal of Geosynthetics*, 25, 27–32.
- Kazi, N., Nedjar, D., Tamine, T., & Hamane, M. (2019). Contribution to probabilistic modeling of soil geo-mechanical properties for structural reliability analysis of buried pipes and foundations. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 6, 249–258.
- Lu, Y., He, J., Jing, Y., & Chen, X. (2023). A Simplified Mechanical Model and Analysis for the Settlement Deformation of Buried Pipelines Caused by Open-Cut Excavation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/app131810356>
- Nugroho, A. P., & Zayadi, R. (2023). Studi Stabilitas Dinding Penahan Tanah pada Pekerjaan Galian Driving Inlet Sudetan Kali Ciliwung. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, Vol. 1 No. 02(02), 297–303.
- Raines, A., Nawang Sari, R., Hanun, Y., & Choiri, A. (2024). Ground Improvement Design Using Prefabricated Vertical Drains at the Container Yard Area of Sunda Kelapa Port, Jakarta. *Journal of Global Engineering Research and Science*, 3(1), 19–26. <https://doi.org/10.56904/j-gers.v3i1.83>
- Septiastuti, F., Rahardjo, P. P., & Indrayana, R. K. (2023). Evaluasi Shear Strength dan Stress History Tanah Lunak pada Pekerjaan Vacuum Preloading Menggunakan Uji CPTu. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(3), 385–396. <https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.3.7>
- Shirokov, V. S. (2018). Soil and Traffic Loads on Underground Pipelines. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 55(2), 115–119. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9512-6>
- Solehudin, A., Permana, E., & Salam, H. (2022). Identification of Soil Corrosion Potential for Planning in the Gas Pipeline Cathodic Protection System. *Spektra: Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 7(1), 29–38. <https://doi.org/10.21009/spektra.071.03>
- Suaryana, N., & Fransisko, S. (2018). Stabilisasi Dua Tahap Menggunakan Kapur dan Semen untuk Memperbaiki Daya Dukung Tanah Ekspansif. *Jurnal Jalan-Jembatan*,

35(1), 31–39.

- Tang, J., Xu, J., Zhou, D., Huang, D., Zeng, K., Li, Y., & Chen, Z. (2023). Ground Surface Deformation Caused by Pipe Jacking Construction in a Soft Soil Area: An Experiment-Based Study. *Buildings*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/buildings13071628>
- Xu, L. W., Liu, X., & Chen, F. Q. (2018). Mechanical analysis of buried suspended pipeline under the action of collapse. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 35(12), 212–228. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.11.0837>
- Zhang, J., Liang, Z., & Han, C. J. (2015). Numerical modeling of mechanical behavior for buried steel pipelines crossing subsidence strata. *PLoS ONE*, 10(6), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130459>