

PENURUNAN FONDASI TIANG TUNGGAL PADA PEMBEBANAN LATERAL AKIBAT PENAMBAHAN BEBAN AKSIAL

Aziz Abdul Majid¹, Bambang Setiawan² dan Niken Silmi Surjandari³

¹Program Studi D3 Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: almajid.aziz@staff.uns.ac.id

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: bambangsetiawan@staff.uns.ac.id

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta
Email: nikensilmisurjandari@staff.uns.ac.id

ABSTRACT

The pile foundation is the lower building structure that supports the above structure. Pile foundations withstand combined loads from the vertical and horizontal directions. In the field, both loads work simultaneously. However, in Indonesia, in general, the axial and lateral loading tests are carried out separately. Related to this, there have been few investigations on the influence of combined loads on pile foundations. These led to inconsistent results to the effects of adding the axial load on the lateral loading. The three-dimensional finite element method is used in this study to analyze the effect of vertical displacement on a single pile foundation with the additional axial loads on lateral loads. Two pile foundation models were made, the first pile foundation model is a single pile foundation without a pile cap, while the second pile foundation model is modeled with a pile cap. Two models were applied by the lateral load with the additional variation axial load of 0H, 0.25H, 0.5H, 0.75H, and 1H. The vertical displacement is significantly decreased in the pile foundation model with a pile cap compared to the pile foundation model without a pile cap. The reduction in vertical displacement of pile foundations with a pile cap due to the addition of axial loads affects up to 30%, 24%, 19%, 16%, 14% of pile foundations without a pile cap, respectively. This research is expected to help decision making consideration in the design and planning for pile foundations.

Keywords: single pile foundation, axial load, lateral load, combine load, vertical settlement

ABSTRAK

Fondasi tiang merupakan struktur bawah pada konstruksi bangunan yang menopang struktur di atasnya. Fondasi tiang menahan beban gabungan dari arah vertikal dan horizontal. Di lapangan, kedua beban tersebut bekerja secara bersamaan. Namun, di Indonesia pada umumnya pengujian beban aksial dan beban lateral dilakukan secara terpisah. Terkait hal ini, masih sedikit investigasi mengenai pengaruh beban gabungan terhadap fondasi tiang. Hal ini menyebabkan hasil yang tidak konsisten terhadap pengaruh penambahan beban aksial terhadap beban lateral. Metode elemen hingga tiga dimensi digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh nilai penurunan vertikal pada fondasi tiang tunggal dengan penambahan beban aksial terhadap beban lateral. Dua model fondasi tiang dibuat, model fondasi tiang pertama adalah fondasi tiang tunggal tanpa *pile cap*, sedangkan model fondasi tiang kedua dimodelkan dengan *pile cap*. Selanjutnya kedua model fondasi tiang tersebut diaplikasikan beban lateral dengan variasi penambahan beban aksial sebesar 0H, 0,25H, 0,5H, 0,75H, dan 1H. Model fondasi tiang dengan *pile cap*, mengalami nilai penurunan vertikal yang signifikan dibandingkan dengan model fondasi tiang tanpa *pile cap*. Penurunan vertikal fondasi tiang dengan *pile cap* akibat penambahan beban aksial mempengaruhi hingga 30%, 24%, 19%, 16%, 14% dari fondasi tiang tanpa *pile cap* secara berurutan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan terhadap pengujian hingga perencanaan desain fondasi tiang.

Kata kunci: fondasi tiang tunggal, beban aksial, beban lateral, beban kombinasi, penurunan vertikal

1. PENDAHULUAN

Fondasi tiang adalah struktur bawah dalam konstruksi bangunan yang menopang struktur di atasnya. Konstruksi tersebut seperti gedung bertingkat, jembatan, bendung, dermaga, pembangkit listrik, dan masih banyak lagi yang lainnya. Fondasi tiang menahan beban gabungan dari arah vertikal dan horizontal. Di lapangan, kedua beban tersebut bekerja secara bersamaan. Di Indonesia, pada umumnya pengujian beban aksial dan beban lateral dilakukan secara terpisah. Terkait hal ini, masih sedikit investigasi mengenai pengaruh beban gabungan terhadap fondasi tiang

di Indonesia. Hal ini menyebabkan hasil yang tidak konsisten terhadap pengaruh penambahan beban aksial terhadap beban lateral.

Penelitian yang telah dilakukan mengenai pembebanan gabungan pada fondasi tiang, baik fondasi tiang tunggal maupun fondasi tiang kelompok, pada beberapa kasus penggunaan fondasi gabungan pelat-tiang merupakan salah satu cara yang efektif untuk meningkatkan daya dukung serta mengurangi nilai penurunan vertikal (Bhaduri & Choudhury, 2020) (Boudaa et al., 2019) (Mirsayapov & Koroleva, 2016) (Siraziev, 2018), disebutkan pula bahwa fondasi tiang tunggal pada tanah pasir yang dibebani beban gabungan terbukti dapat memadatkan tanah di sekitar fondasi dan kemudian menurunkan nilai perpindahan horizontal dan momen lentur fondasi tiang akibat beban aksial (Lu & Zhang, 2018). Hasil yang ditunjukkan pada fondasi tiang pada kondisi *free head* dibandingkan dengan fondasi tiang dengan *pile cap* di bawah kombinasi beban lateral-aksial pada tanah berpasir meningkatkan kapasitas lateral dan momen lentur secara signifikan pada kondisi fondasi tiang dengan *pile cap* (Chatterjee & Deepankar, 2016). Analisis perilaku fondasi tiang pada tanah pasir berlapis dengan beban gabungan lateral dan aksial menyebabkan terjadinya nilai defleksi lebih kecil dibandingkan pada saat fondasi tiang yang tidak terpengaruh oleh pembebanan aksial (Ibrahim et al., 2018).

Terlebih lagi, pengaruh beban aksial akan meningkatkan kapasitas dukung pada tanah berpasir dan sedikit pada tanah berlempung apabila fondasi tiang dibebani oleh beban kombinasi (Abbas et al., 2018). Analisis sistem fondasi tiang pancang juga dipertimbangkan, dan menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan dari interaksi struktur tiang pancang dan konfigurasi tiang pancang terhadap respon seismik superstruktur, sehingga sistem ini sangat direkomendasikan untuk digunakan pada tanah lunak (Bagheri et al., 2018); selain itu, hasil analisis juga menunjukkan bahwa kapasitas lateral ultimit tiang pancang tidak ditentukan oleh gaya leleh tiang pancang tunggal (Zhang et al., 2020). Penambahan beban aksial sebesar lima kali beban lateral menunjukkan tidak ada perubahan pada penurunan vertikal; namun, ketika beban kurang dari lima kali, beban lateral meningkatkan nilai tersebut akibat beban gabungan (Gunawan et al., 2021). Sebuah studi interaksi pembebanan aksial-lateral pada fondasi tiang tunggal telah dianalisis dengan menggunakan pengujian skala kecil di laboratorium dan metode elemen hingga untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai penurunan vertikal dan perpindahan horizontal menunjukkan hasil bahwa pembebanan lateral tidak akan menyebabkan bertambahnya nilai penurunan vertikal, sedangkan apabila kedua beban baik aksial maupun lateral bekerja secara bersamaan diketahui beban lateral akan menambah nilai dari penurunan vertikal dan terakhir pembebanan aksial akan mengurangi nilai defleksi horizontal (Gunawan et al., 2022) (Gunawan et al., 2025). Penggunaan metode numerik tiga dimensi untuk mengevaluasi pengaruh beban kombinasi pada fondasi tiang dengan kondisi tanah homogen dan berlapis menunjukkan bahwa kapasitas dukung tiang tidak berpengaruh signifikan pada tanah homogen sedangkan pada tanah berlapis pengaruh beban kombinasi ditemukan tidak hanya bergantung pada karakteristik tanah di sekitar namun juga pada tanah yang berada di bawah ujung dari fondasi tiang tersebut (Hazzar et al., 2017b)

Beberapa peneliti telah membuktikan bahwa penambahan beban aksial meningkatkan kapasitas lateral dan momen lentur yang terjadi serta mengurangi nilai perpindahan horizontal. Namun, masih sedikit penelitian yang berkaitan dengan nilai penurunan fondasi tiang akibat pembebanan lateral-aksial yang digabungkan. Hal ini berkaitan dengan pengujian pembebanan fondasi tiang yang dilakukan secara terpisah baik pengujian pembebanan vertikal dan pembebanan horizontal, sedangkan di lapangan kedua beban tersebut bekerja bersama secara simultan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari pembebanan gabungan pada fondasi tiang tunggal terhadap nilai penurunan vertikal.

Metode elemen hingga tiga dimensi digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis pengaruh penurunan vertikal pada fondasi tiang tunggal dengan tambahan beban aksial terhadap beban lateral. Dua model fondasi tiang dibuat, model fondasi tiang pertama adalah fondasi tiang tunggal tanpa *pile cap*, sedangkan model fondasi tiang kedua dimodelkan dengan *pile cap*.

2. METODE

Metode elemen hingga (*finite element method*)

Penggunaan metode elemen hingga dalam menganalisis permasalahan teknik sipil, seperti teknik struktur, perkerasan jalan, dan teknik geoteknik, telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Implementasi pemodelan elemen hingga untuk rekayasa struktur dapat memberikan hasil yang sesuai, oleh karena itu, penggunaan model elemen hingga untuk menyelesaikan permasalahan dalam bidang teknik sipil dapat memberikan hasil yang sesuai dengan kondisi lapangan (Mase et al., 2022). Program metode elemen hingga tiga dimensi SAP2000 digunakan untuk menganalisis fondasi tiang yang dimodelkan. Dua model fondasi tiang pancang dibuat dengan elemen solid dan kedua model tersebut akan diberikan variasi penambahan beban aksial pada beban kombinasi. Spesifikasi fondasi tiang dan variasi beban yang diberikan ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini

Tabel 1. Spesifikasi fondasi tiang pancang

Spesifikasi	Nama		Satuan
	Tanpa <i>Pile Cap</i>	Dengan <i>Pile Cap</i>	
Jenis	<i>PC Spun pile</i>	<i>PC Spun pile</i>	-
Diameter	60	60	cm
Ketebalan	10	10	cm
Panjang total	31,45	31,45	m
fc'	52	53	MPa
Ketebalan <i>pile cap</i>	-	80	cm
fc'	-	30	cm

Tabel 2. Variasi beban yang diterapkan

Jenis	Variasi beban					Gabungan
	Lateral	0,25H	Aksial 0,50H	0,75H	1H	
Tanpa <i>pile cap</i>	√	√	√	√	√	√
Dengan <i>pile cap</i>	√	√	√	√	√	√

Parameter tanah

Model tanah dalam penelitian ini menggunakan data tanah asli dari pengujian lapangan di PT. X di Indonesia dan dimodelkan seperti kondisi di lapangan. Namun, penelitian ini perlu meninjau ulang data tanah di lapangan untuk menemukan nilai-nilai yang tidak diketahui. Nilai-nilai tersebut didekati atau dikorelasikan dengan menggunakan data dari lapangan N-SPT. Parameter tanah untuk analisis FEM dapat dilihat pada Tabel 3 berikut ini.

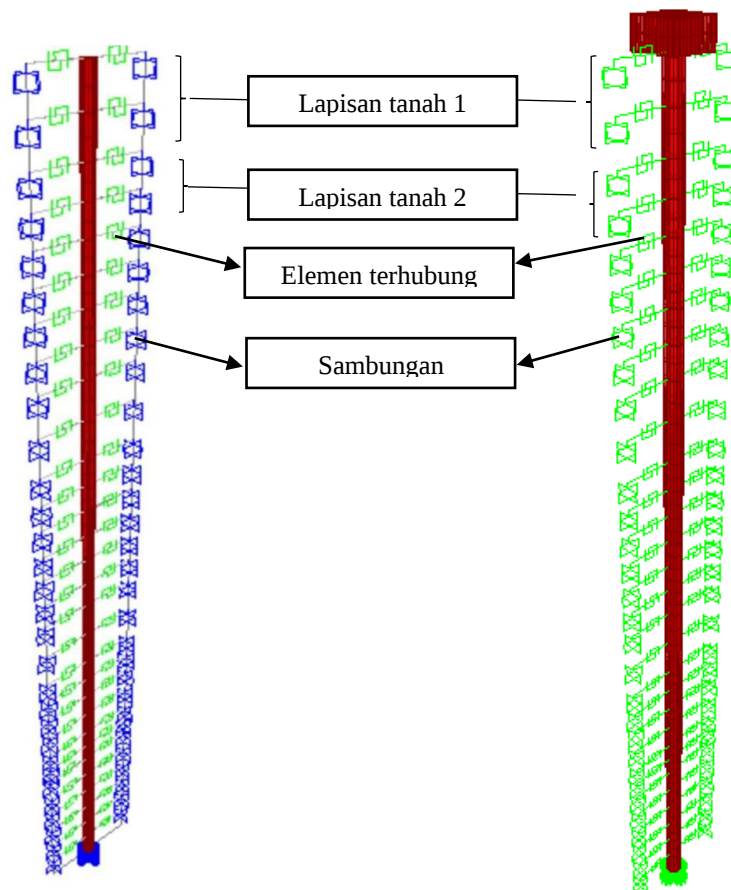
Tabel 3. Parameter tanah untuk metode elemen hingga

Kedalaman (m)	Jenis tanah	N-SPT	ϕ (°)	γ_{eff} (kN/m ³)	c_u (kN/m ²)
0 – 2,45	<i>Tanah liat lunak (sedang)</i>	4	0	18	25
2,45 – 4,45	<i>Pasir</i>	7	32,3	16	0
4,45 – 6,45	<i>Pasir</i>	5	32,3	8,19	0
6,45 – 8,65	<i>Pasir</i>	6	32	8,19	0
8,65 – 11,45	<i>Tanah liat lunak</i>	1	0	6,19	6
11,45 – 13,45	<i>Tanah liat lunak</i>	1	0	6,19	6
13,45 – 15,45	<i>Tanah liat lunak</i>	2	0	6,19	11
15,45 – 17,45	<i>Pasir</i>	9	32	8,19	0
17,45 – 20,15	<i>Pasir</i>	19	35	8,19	0
20,15 – 21,95	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	12	0	10,19	75
21,95 – 23,95	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	13	0	10,19	78
23,95 – 25,45	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	13	0	10,19	78
25,45 – 27,45	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	17	0	9,19	115
27,45 – 29,45	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	28	0	12,19	180
29,45 – 31,45	<i>Tanah liat kaku dengan air bebas</i>	29	0	12,19	195

Interaksi model tanah

Interaksi antara model tanah dan model fondasi tiang pancang pada metode elemen hingga menggunakan elemen terhubung berdasarkan kurva p-y, rekomendasi untuk tanah lempung lunak (sedang) (Matlock, 1970), rekomendasi untuk tanah pasir (Reese et al., 1974), rekomendasi untuk tanah lempung kaku dengan air bebas (Reese et al., 1975), dan rekomendasi untuk kurva t-z (American Petroleum Institute, 2002), nilai pegas batas-bawah dan batas-atas dihitung dengan mempertimbangkan ketidakpastian karakteristik tanah dan variabilitas tanah (Hanifah et al., 2017). Model tanah ditentukan untuk setiap setengah ketebalan lapisan tanah berdasarkan nilai pembacaan N-SPT. Elemen penghubung kemudian diaplikasikan pada kedua sisi model fondasi tiang pancang, dengan masing-masing sisi bertumpu dua sambungan.

Berikut ini adalah interaksi antara tanah dan model fondasi tiang pancang yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1.
fondasi tiang-tanah

Interaksi model

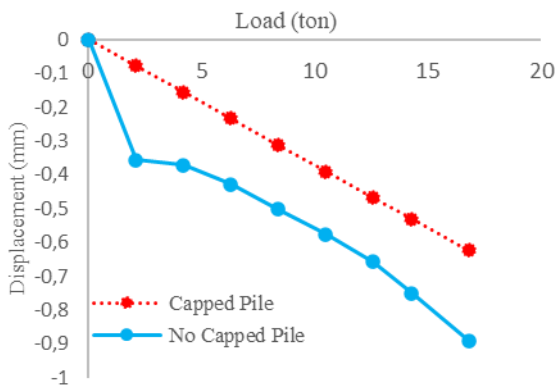
3. HASIL

DAN

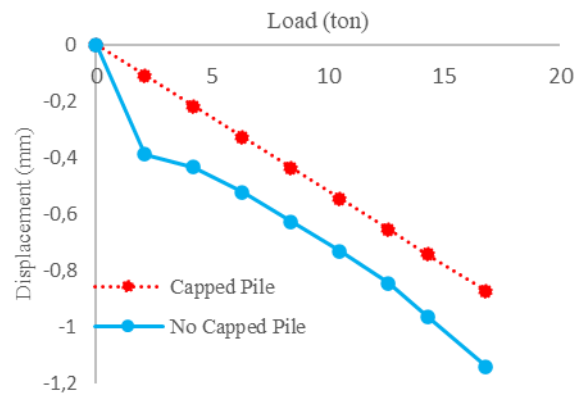
PEMBAHASAN

Hasil analisis kedua model fondasi tiang tanpa *pile cap* dan dengan *pile cap* dengan masing-masing variasi beban yang diterapkan ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini. Berdasarkan Gambar 2, menunjukkan bahwa pada beban lateral 200% yaitu 16,8 ton, kondisi model fondasi tiang pancang pada Gambar 2 (a) dengan variasi 0H mengalami nilai penurunan vertikal sebesar 0,6283 mm dan 0,8910 mm, Gambar 2 (b) dengan variasi 0,25H mengalami nilai penurunan vertikal sebesar 0,8721 mm dan 1,1407 mm, Gambar 2 (c) dengan variasi 0,50H nilai penurunan vertikal

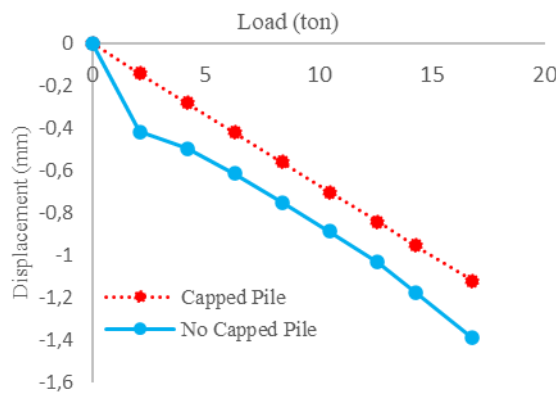
sebesar 1,1214 mm dan 1,3903 mm, Gambar 2 (d) dengan variasi 0,75H nilai penurunan vertikal sebesar 1.3710 mm dan 1.6399 mm, gambar 2(e) dengan variasi 1H nilai penurunan vertikal sebesar 1,6203 mm dan 1,8896 mm pada model fondasi dengan *pile cap* dan tanpa *pile cap*. Gambar 2 menunjukkan bahwa dari kelima variasi tersebut, penurunan vertikal meningkat seiring dengan bertambahnya variasi beban aksial yang diberikan pada kedua model fondasi. Hasil yang berbeda terjadi pada kondisi tanah berpasir, dimana penambahan beban aksial akan berpengaruh pada nilai deformasi tetapi akan meningkatkan kepadatan tanah tersebut (Hazzar et al., 2017a). Nilai penurunan vertikal juga berkurang pada kondisi model fondasi dengan *pile cap* dibandingkan dengan model fondasi tanpa *pile cap*.



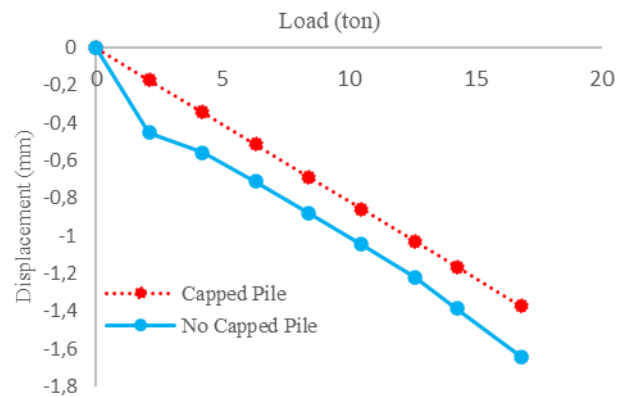
(a)



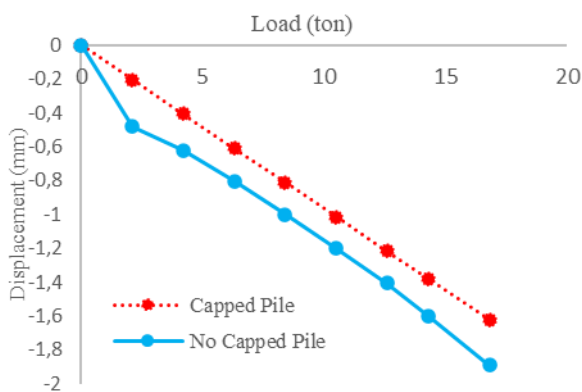
(b)



(c)



(d)



(e)

Keterangan:

(a) Variasi 0H

(b) Variasi beban aksial 0,25H

(c) Variasi beban aksial 0,50H

(d) Variasi beban aksial 0,75H

(e) Variasi beban aksial 1H

Displacement = Perpindahan

Load = Beban

Capped pile = Dengan *pile cap*

No capped pile = Tanpa *pile cap*

Gambar 2. Perbandingan perpindahan vertikal dan beban dengan dan tanpa *pile cap*

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari lima variasi masing-masing penambahan beban aksial 0,25H, 0,50H, 0,75H, dan 1H pada pembebanan lateral, terjadi peningkatan penurunan vertikal yang cukup signifikan dari kedua model fondasi tiang pancang. Nilai penurunan vertikal model fondasi tiang dengan *pile cap* mengalami peningkatan sebesar 29%, 44%, 55%, dan 62%, sedangkan model fondasi tiang tanpa *pile cap* mengalami peningkatan sebesar 22%, 36%, 46%, dan 53%. Namun, model fondasi tiang dengan *pile cap*, nilai tersebut mengalami pengurangan yang cukup signifikan dibandingkan dengan model fondasi tiang tanpa *pile cap*. Pengurangan penurunan vertikal fondasi tiang pancang dengan *pile cap* akibat penambahan beban aksial masing-masing berpengaruh hingga 30%, 24%, 19%, 16%, 14% terhadap fondasi tiang pancang tanpa *pile cap*. Hal ini dapat terjadi karena pada saat beban lateral mengenai ujung fondasi tiang pancang di atas tanah yang dominan lempung, tanah di sekitar fondasi tidak mengalami kenaikan tegangan, kondisi yang berbeda terjadi pada tanah berpasir. Penelitian ini menyoroti pentingnya dalam pertimbangan terhadap bertambah dan berkurangnya nilai penurunan vertikal akibat penambahan beban aksial di bawah beban lateral dan *pile cap* dalam pengujian hingga perencanaan desain fondasi tiang.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua pihak dan rekan-rekan di bidang geoteknik yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA (DAN PENULISAN PUSTAKA)

- Abbas, J. M., Chik, Z., & Taha, M. R. (2018). Modelling and assessment of a single pile subjected to lateral load. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40(1), 65–78.
- American Petroleum Institute. (2002). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design API Recommended Practice RP2A-WSD*.
- Bagheri, M., Ebadi-Jamkhaneh, M., & Samali, B. (2018). Effect of Seismic Soil-Pile-Structure Interaction on Mid- and High-Rise Steel Buildings Resting on a Group of Pile Foundations. *International Journal of Geomechanics*, 18(9), 04018103.
- Bhaduri, A., & Choudhury, D. (2020). Serviceability-based finite-element approach on analyzing combined pile–raft foundation. *International Journal of Geomechanics*, 20(2).
- Boudaa, S., Khalfallah, S., & Bilotta, E. (2019). Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11, 21–30.
- Chatterjee, K., & Deepankar, C. (2016). Analytical and numerical approaches to compute the influence of vertical load on lateral response of single pile. *Japanese Geotech Society Special Publication*, 2(36), 1319–1322.
- Gunawan, S., Hadsari, V., Ekaputra, O., & Hastuti, C. S. (2025). Interaksi Simultan Beban Axial-Lateral pada Pondasi Tiang Tunggal. *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, 2(4).
- Gunawan, S., Surjandari, N. S., Setiawan, B., & Purwana, Y. M. (2021). Vertical displacement of a single pile due to axial and lateral loads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 841(1), 012006.
- Gunawan, S., Surjandari, N. S., Setiawan, B., & Purwana, Y. M. (2022). Additional horizontal movement of the single pile foundation with combined loads. *Proceedings of the Second International Conference of Construction, Infrastructure, and Materials*, 1–12.
- Hanifah, Y. N., Budipriyanto, A., & Rahardjo, I. P. (2017). Seismic performance evaluation of a pile-supported pier in Aceh, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 267(1), 012022.
- Hazzar, L., Hussien, M. N., & Karray, M. (2017a). Influence of vertical loads on lateral response of pile foundations in sands and clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(2), 291–304.
- Hazzar, L., Hussien, M. N., & Karray, M. (2017b). Vertical load effects on the lateral response of piles in layered media. *International Journal of Geomechanics*, 17(9).
- Ibrahim, S. F., Al-Soud, M. S., & Al-Asadi, F. I. (2018). Performance of a Single Pile Under Combined Axial and Lateral Loads in Layered Sandy Soil. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 22(1), 121–136.
- Lu, W., & Zhang, G. (2018). Lu W and Zhang G 2018 Influence mechanism of vertical-horizontal combined loads on the response of a single pile in sand. *Soils and Foundations*, 58(5), 1228–1229.
- Mase, L. Z., Yundrismein, R., Nursalam, M. A., Putra, S. M., Shelina, A., & Nugroho, S. H. (2022). A study of site-specific response analysis and structural analysis (A case study of the Lighthouse View Tower in Bengkulu City, Indonesia). *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 37(3), 197–209.

- Matlock, H. (1970). Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. *Offshore Technology Conference*.
- Mirsayapov, I., & Koroleva, I. (2016). Long-term settlements assessment of high-rise building groundbase based on analytical ground deformation diagram. *Procedia Engineering*, 165, 519–527.
- Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1974). Analysis of laterally loaded piles in sand. *Offshore Technology Conference*.
- Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1975). Field testing and analysis of laterally loaded piles om stiff clay. *Offshore Technology Conference*.
- Siraziev, L. F. (2018). Experimental studies of the stress-strain state of layered soil bases under the center of the stamp during short-term tests. *Innovations and Investments*, 11, 225–228.
- Zhang, Y., Chen, X., Zhang, X., Ding, M., Wang, Y., & Liu, Z. (2020). Zhang Y, Chen X, Zhang X, Ding M, Wang Y and Liu Z Nonlinear response of the pile group foundation for lateral loads using pushover analysis. *Earthquakes and Structure*, 19(4), 273–286.