

ANALISIS MODIFIKASI TIANG PANCANG TERHADAP GAYA ANGKAT AKIBAT MUKA AIR TANAH

*M. Yusril Inza Mahendra¹, Yerry Kahaditu Firmansyah¹, Dian Purnamawati Solin¹

¹Fakultas Teknik dan Sains, UPN “Veteran” Jawa Timur, Kota Surabaya, Indonesia

*)Penulis korespondensi: M. Yusril Inza Mahendra (yusrilinza44@gmail.com)

Received: 07 Mei 2026 Revised: 05 Juni 2026 Accepted: 08 Juni 2026

Abstract— *Fluctuations in the groundwater table not only generate hydrostatic uplift forces on the foundation slab but also alter the consolidation characteristics of the underlying clay (A. Rifai and T. S. Kurniadi, 2023). This study on a hotel construction project aims to analyze the performance of pile foundations subjected to uplift forces due to a rise in the groundwater level of up to 2.5 meters. The analysis examines axial bearing capacity using the method by Nakazawa, K. (1983), as well as deformations specifically axial settlement and lateral deflection using the finite element method. The analysis yielded an ultimate bearing capacity of 406.9 kN. Regarding deformation, initial uplift of 42 millimeters occurred in some foundation areas, followed by an additional 2.5-meter uplift. This issue confirms that uplift forces caused by groundwater exert a significant impact that can weaken foundation capacity and increase the risk of deformation. This condition is considered hazardous to structural stability if not addressed promptly. As a mitigation measure, this study recommends optimization efforts through changes in the dimensions of structural components. The proposed solution is to increase the pile diameter from 0.6 meters to 1 meter, to ensure that the overall foundation performance remains within safe limits and meets technical requirements.*

Keywords — *Bearing Capacity, Foundation, Uplift Force*

Abstrak— *Fluktuasi muka air tanah tidak hanya memicu gaya angkat hidrostatik pada pelat fondasi, tetapi juga mengubah karakteristik konsolidasi tanah lempung di bawahnya (A. Rifai and T. S. Kurniadi, 2023). Penelitian mengenai proyek pembangunan hotel ini bertujuan untuk menganalisis kinerja fondasi tiang pancang yang mengalami kenaikan akibat muka air tanah dengan ketinggian maksimal sepanjang 2.5 meter. Analisis ini dilakukan terhadap kapasitas daya dukung aksial dengan menggunakan metode Nakazawa, K. (1983), deformasi berupa penurunan aksial dan defleksi lateral menggunakan finite element method. Pada analisis, diperoleh kapasitas daya dukung ultimit sebesar 406.9 kN. Dari sisi deformasi, pada beberapa area fondasi mengalami kenaikan awal sepanjang 42 meter, lalu mengalami kenaikan setinggi 2.5 meter. Dari permasalahan tersebut mengonfirmasi bahwa gaya angkat akibat air tanah memberikan dampak signifikan yang dapat memperlemah kapasitas serta meningkatkan risiko deformasi pada fondasi. Kondisi ini dinilai membahayakan stabilitas struktur jika tidak segera ditangani. Sebagai langkah mitigasi, penelitian ini merekomendasikan upaya optimasi melalui perubahan dimensi komponen struktur. Solusi yang diusulkan adalah memperbesar diameter tiang pancang dari ukuran semula 0,6 meter menjadi 1 meter, guna memastikan seluruh kinerja fondasi tetap berada dalam batas aman dan memenuhi persyaratan teknis.*

Kata kunci — *Daya Dukung, Fondasi, Gaya Angkat*

1. PENDAHULUAN

Dalam sebuah proyek *high-rise building*, fungsi fondasi sudah bukan hanya sekadar penyalur beban statis. Fondasi adalah instrumen mitigasi paling krusial untuk mengatasi ketidakpastian kondisi terjadinya gaya angkat (*uplift force*) dan beban dinamis akibat seismik yang sering kali sulit diprediksi di lapangan. Fondasi adalah elemen krusial dalam struktur teknik sipil yang bertujuan untuk mendukung struktur dan mendistribusikan beban yang diterima menuju tanah dasar sehingga harus memiliki kemampuan untuk menahan beban struktur dan mencegah terjadinya kegagalan suatu struktur Sibuea, (H. O. J., Fansuri, M. H., & Siagian, G. A., 2025).

Fondasi tiang pancang (*pile foundation*) dapat dikategorikan sebagai fondasi dalam yang berfungsi utama menyalurkan beban struktural menuju lapisan tanah keras yang terletak jauh di bawah permukaan. Dalam mekanisme ini, beban vertikal atau gaya aksial dari struktur atas ditransfer melalui kombinasi antara tahanan

ujung (*end bearing*) pada lapisan pendukung dan gesekan selimut (*skin friction*) di sepanjang badan tiang. Daya dukung lateral pada tiang dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan dua kriteria utama, yaitu daya dukung izin lateral yang berasal dari kapasitas ultimit dibagi faktor keamanan, serta batasan nilai defleksi lateral yang diizinkan agar tidak mengganggu integritas struktur (Yulianti, Y., Handiman, I., Gusnadi, Z., Sarifah, F., & Nursani, R, 2025). Defleksi lateral adalah simpangan pada arah lateral yang terjadi akibat beban pada suatu struktur. Besar beban lateral yang diterima mempengaruhi besar defleksi lateral menurut (Badan Standarisasi Nasional, 2017).

Fondasi tiang pancang adalah komponen krusial dalam menopang struktur bangunan, namun tidak luput dari potensi kegagalan struktur, salah satunya adalah akibat gaya angkat yang dipicu oleh kenaikan muka air tanah secara ekstrem (S. Aljawarneh, M. Aldwairi, and M. B. Yassein, 2018). Keberadaan muka air tanah menjadi faktor koreksi krusial guna mendapatkan nilai daya dukung izin yang representatif, terutama pada lapisan lempung yang memiliki potensi penurunan tinggi (M. Firdaus and Ruspriansyah, 2025). Selain itu kenaikan muka air tanah secara drastis desain tiang *anti-uplift* harus memperhitungkan perubahan tekanan hidrostatik untuk mencegah pengangkatan struktur secara keseluruhan (R. B. Thorne and L. M. Williams, 2021). Kondisi ini mengakibatkan pelemahan pada antarmuka antara tiang pancang dan tanah lempung, sehingga meningkatkan risiko *heaving* atau pengangkatan fondasi (B. Setiawan and R. Pratama, 2023). Kapasitas daya dukung *uplift* fondasi tiang akan menurun seiring dengan berkurangnya kedalaman penanaman (*burial depth*) (Fang, J., Lin, S., & Liu, K, 2023). Jika tekanan akibat kondisi air tanah ini tidak diperhitungkan dalam perencanaan, hal tersebut dapat mengakibatkan deformasi serius hingga kerusakan fatal pada keseluruhan kerangka bangunan di atasnya.

Meskipun studi mengenai kapasitas dukung dan deformasi tiang pancang telah banyak dilakukan, kebanyakan literatur masih berpijak pada asumsi kondisi tiang ideal sesuai rancangan awal. Masih terdapat keterbatasan dalam penelitian yang secara spesifik mengevaluasi dampak fenomena *uplift* (kenaikan tiang) terhadap penurunan kedalaman efektif fondasi. Ketahanan gesek lateral rata-rata pada badan tiang cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya beban *uplift* dan mencapai nilai maksimum (J. Fang, S. Lin, and K. Liu, 2023). Selain itu, integrasi antara analisis daya dukung aksial, lateral, serta parameter deformasi dalam satu model evaluasi yang menyeluruh masih jarang ditemui, terutama dalam konteks karakteristik tanah di Indonesia. Terdapat gaya yang dapat menahan terjadinya kenaikan yaitu *skin friction*. Pada kondisi fondasi tekan, *skin friction* bekerja membantu menahan beban vertikal. Namun, pada kondisi di mana fondasi cenderung terangkat (misalnya akibat kenaikan muka air tanah atau gaya Tarik. *Skin friction* positif yang terbentuk di sepanjang antarmuka tiang-tanah merupakan faktor penentu utama dalam mencegah kegagalan struktur akibat gaya uplift (N. K. Choudhary and R. K. Dutta, 2022).

Oleh karena itu, penelitian ini memberikan upaya berupa analisis yang menghitung kekuatan pada fondasi saat mengalami kenaikan. Penelitian ini juga tidak hanya sekedar melakukan perhitungan manual seperti metode Nakazawa, akan tetapi juga menggunakan simulasi numerik untuk melihat interaksi antara tanah dengan tiangnya secara presisi. Sebagai langkah mitigasi, penelitian ini menguji efektivitas modifikasi dimensi tiang fondasi untuk menjamin stabilitas struktur tetap terjaga, meskipun berada pada kondisi lapangan yang tidak ideal. Peningkatan diameter tiang secara signifikan memperluas area kontak permukaan yang memicu mobilisasi *skin friction* lebih besar. Hal ini tidak hanya meningkatkan kapasitas aksial tekan, tetapi juga memberikan stabilitas lateral dan ketahanan *uplift* yang lebih superior dibandingkan tiang dengan diameter kecil (S. Chen and J. Zhang, 2021)

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada proyek pembangunan hotel yang berada di wilayah Surabaya, Jawa Timur, yang memiliki struktur bangunan dengan fondasi tiang pancang. Lokasi penelitian difokuskan pada area fondasi yang mengalami kenaikan. Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada tahun 2025-2026, dengan pengambilan data berdasarkan hasil investigasi tanah dan data perencanaan proyek.

2.2 Data Penelitian

Koreksi Nilai *Standard Penetration Test*

Data *Standard Penetration Test* (SPT) yang didapatkan secara langsung dari pengujian lapangan tidak dapat langsung digunakan tanpa melalui proses penyesuaian. Diperlukan serangkaian koreksi teknis guna memperoleh nilai yang lebih akurat dan representatif terhadap kondisi aktual. Parameter koreksi tersebut mencakup efisiensi energi palu (*hammer efficiency*), pengaruh diameter lubang tiang pancang, panjang batang

tiang pancang yang digunakan, tekanan tanah vertikal (*overburden pressure*), serta keberadaan muka air tanah pada lokasi penelitian.

Nilai hasil koreksi dinyatakan sebagai nilai N_{60} , yang dihitung dengan persamaan:

$$N_{60} = \frac{EH \times CB \times CS \times CR \times N}{0,6} \quad (1)$$

Dimana:

EH = hammer efficiency

CB = koreksi diameter lubang bor

CS = koreksi jenis sampler

CR = koreksi panjang batang bor

N = N-SPT

Selanjutnya, dilakukan koreksi terhadap tekanan overburden untuk memperoleh nilai $(N1)_{60}$, dengan persamaan:

$$(N1)_{60} = CN \times N_{60} < 2N_{60} \quad (2)$$

Dimana:

CN = faktor koreksi overburden pressure

N_{60} = nilai SPT terkoreksi untuk Prosedur Lapangan

Untuk menghitung CN menggunakan rumus berikut:

$$CN = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_{v0}}} \quad (3)$$

Dimana:

σ'_{v0} = tegangan overburden efektif vertikal awal

Analisis Kapasitas Daya Dukung Aksial Tiang Pancang

Menurut K. Nakazawa, daya dukung fondasi didefinisikan sebagai kemampuan tanah untuk menahan beban yang bekerja di atasnya tanpa menyebabkan keruntuhan geser maupun penurunan yang melebihi batas yang diizinkan.

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung nilai daya dukung sudah banyak dikemukakan para ahli. Dalam penelitian ini digunakan persamaan yang dikemukakan oleh K. Nakazawa berdasarkan hasil SPT. Berikut merupakan persamaan tersebut,

$$R_a = \frac{1}{n} \times R_u = \frac{1}{n} (R_p + R_f) \quad (4)$$

dimana:

R_a : Daya dukung yang izin (ton)

R_u : Daya dukung ultimatre (ton)

R_p : Daya dukung ujung fondasi (ton)

R_f : Daya dukung geser fondasi (ton)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji Standard Penetration Test adalah pengujian yang dilakukan di dalam lubang bor dengan cara memukul *split spoon sampler* menggunakan palu standar seberat 63,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 76 cm. Jumlah pukulan yang diperlukan untuk menembus tanah sedalam 30 cm dicatat sebagai nilai N-SPT (*blow count*) (Das, B. M. 2010). Data yang diperlukan untuk menghitung daya dukung fondasi mencakup nilai N-SPT, klasifikasi jenis tanah, dan kedalaman setiap lapisan tanah. Adapun korelasi parameter tanah seperti modulus elastisitas, modulus deformasi, sudut geser, kohesi, poisson ratio, dan permeabilitas (Hisan, F. K., et al., 2024).

Tabel 1. Data N-SPT

Kedalaman (m)	N-SPT
0.00 - 1.00	9
1.00 - 3.00	12
3.00 - 5.50	10
5.50 - 20.00	11
20.00 - 36.00	19.5
36.00 - 50.00	12.7

(Sumber; Penulis, 2026)

Tabel 2. Koreksi Nilai Standard Penetration Test

N	N60	(N1)60' corr
9	12.1	28.5
12	16.1	23.6
10	13.4	19.7
10	13.4	19.0
8	10.7	16.2
16	21.5	24.1
11	14.8	18.5
9	12.1	16.2
11	14.8	17.9
12	16.1	18.5
21	28.2	26.3
22	29.5	26.7
21	28.2	25.5
16	21.5	20.9
18	24.2	22.3
20	26.8	23.6
21	28.2	24.1
17	22.8	20.8
12	16.1	16.7
13	17.4	17.3
10	13.4	14.9
11	14.8	15.6
14	18.8	17.6
15	20.1	18.2
14	18.8	17.4

(Sumber; Penulis, 2026)

3.1 Daya Dukung Fondasi Diameter 0.6 meter

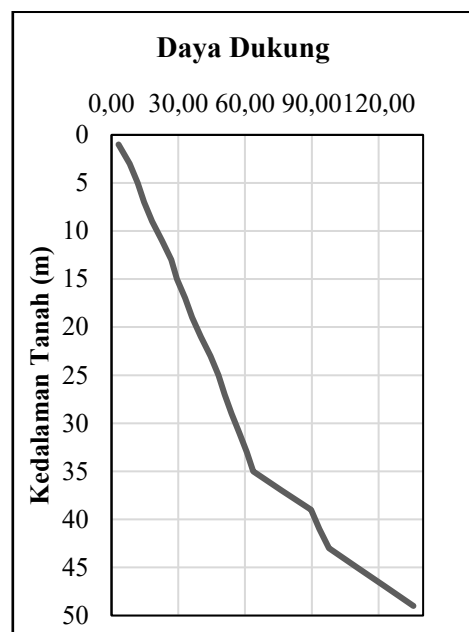
Hasil analisis daya dukung aksial tiang pancang dapat dilakukan dengan menggunakan metode K. Nakazawa, yang mempertimbangkan kontribusi tahanan ujung dan tahanan selimut ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Daya Dukung Fondasi Dimensi 0.6 meter

Kedalaman (m)	(N1)60	Litologi	Rf (Ton)	Ru (Ton)	Ra (Ton)
1	28.5	Clay and silt	0.00	9.48	3.16
3	23.6	Clay and silt	13.08	24.64	8.21
5	19.7	Clay and silt	23.19	35.27	11.76
7	19.0	Clay and silt	33.31	43.84	14.61
9	16.2		45.34	54.82	18.27
11	24.1		57.37	67.85	22.62
13	18.5		68.49	80.55	26.85
15	16.2		77.59	88.12	29.37
17	17.9		88.71	99.24	33.08
19	18.5		98.02	108.66	36.22
21	26.3	Clay and silt	109.70	120.63	40.21
23	26.7		121.33	133.47	44.49
25	25.5		132.39	144.20	48.07
27	20.9		141.94	152.68	50.89
29	22.3		151.77	161.87	53.96

Kedalaman (m)	(N1)60	Litologi	Rf (Ton)	Ru (Ton)	Ra (Ton)
31	23.6	Clay and silt	161.83	172.19	57.40
33	24.1		171.89	182.37	60.79
35	20.8		180.94	190.89	63.63
37	16.7		220.62	229.46	76.49
39	17.3		260.66	268.97	89.66
41	14.9		270.77	280.21	93.40
43	15.6		281.89	292.95	97.65
45	17.6		321.14	331.02	110.34
47	18.2		360.61	368.81	122.94
49	17.4		398.84	406.94	135.65

(Sumber; Penulis, 2026)



Gambar 1. Grafik Daya Dukung Fondasi 0.6m

Setelah dilakukan perbesaran dimensi pada area fondasi didapatkan hasil dari yang berbeda, daya dukung pada fondasi mengalami kenaikan sebagai berikut, Efisiensi perbesaran dimensi ini terlihat pada penurunan drastis nilai deformasi vertikal saat struktur menghadapi fluktuasi muka air tanah yang memicu gaya angkat (R. B. Thorne and L. M. Williams, 2021). Perhitungan daya dukung ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut:

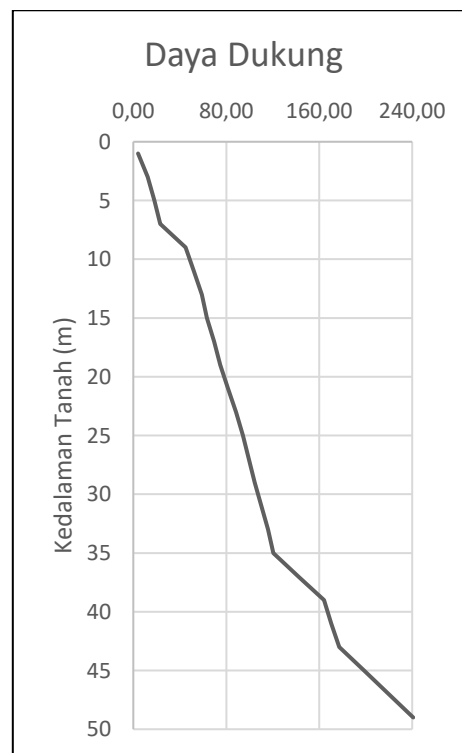
3.2 Daya Dukung Fondasi Diameter 1 meter

Tabel 1. Daya Dukung Fondasi Dimensi 1 meter

Kedalaman (m)	(N1)60	Litologi	Rf (Ton)	Ru (Ton)	Ra (Ton)
1	28.5	Clay and silt	0.00	12.34	4.11
3	23.6	Clay and silt	21.81	36.85	12.28
5	19.7	Clay and silt	38.66	54.39	18.13
7	19.0	Clay and silt	55.51	69.22	23.07
9	16.2		122.91	135.26	45.09
11	24.1		142.97	156.61	52.20
13	18.5		161.50	177.20	59.07
15	16.2		176.67	190.38	63.46

Kedalaman (m)	(N1)60	Litologi	Rf (Ton)	Ru (Ton)	Ra (Ton)
17	17.9	Clay and silt	195.21	208.92	69.64
19	18.5		210.72	224.57	74.86
21	26.3		230.19	244.42	81.47
23	26.7		249.57	265.38	88.46
25	25.5		267.99	283.38	94.46
27	20.9		283.92	297.90	99.30
29	22.3		300.30	313.45	104.48
31	23.6		317.07	330.56	110.19
33	24.1		333.84	347.48	115.83
35	20.8		348.92	361.87	120.62
37	16.7	Clay and silt	415.05	426.56	142.19
39	17.3		481.79	492.60	164.20
41	14.9		498.64	510.93	170.31
43	15.6		517.18	531.57	177.19
45	17.6		582.58	595.45	198.48
47	18.2		648.37	659.05	219.68
49	17.4		712.09	722.63	240.88

(Sumber; Penulis, 2026)



Gambar 2. Grafik Daya Dukung Fondasi 1 meter

3.3 Positive Skin Friction

Positive skin friction merupakan gaya gesek antara tanah dan permukaan tiang yang memberikan kontribusi positif terhadap daya dukung fondasi, karena membantu menahan beban struktur melalui tahanan sepanjang batang tiang. *Positive skin friction* merupakan perhitungan yang dapat mengetahui apakah suatu fondasi bisa dikatakan dapat terjadi kenaikan ditunjukkan pada Tabel 5 sebagai berikut:

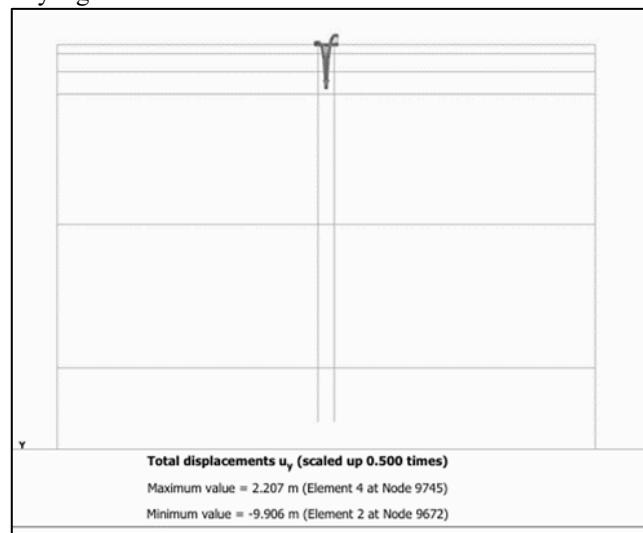
Tabel 5. *Positif Skin Friction*

Kedalaman (m)	N	Qs
0.00 - 1.00	9	474.8
1.00 - 3.00	12	633.0
3.00 - 5.50	10	527.5
5.50 - 20.00	10	527.5
	8	422.0
	16	844.0
	11	580.3
	9	474.8
	11	580.3
20.00 - 36.00	12	633.0
	21	1107.8
	22	1160.5
	21	1107.8
	16	844.0
	18	949.5
	20	1055.0
36.00 - 50.00	21	1107.8
	17	896.8
	12	633.0
	13	685.8
	10	527.5
	11	580.3
	14	738.5
	15	791.3
	14	738.5

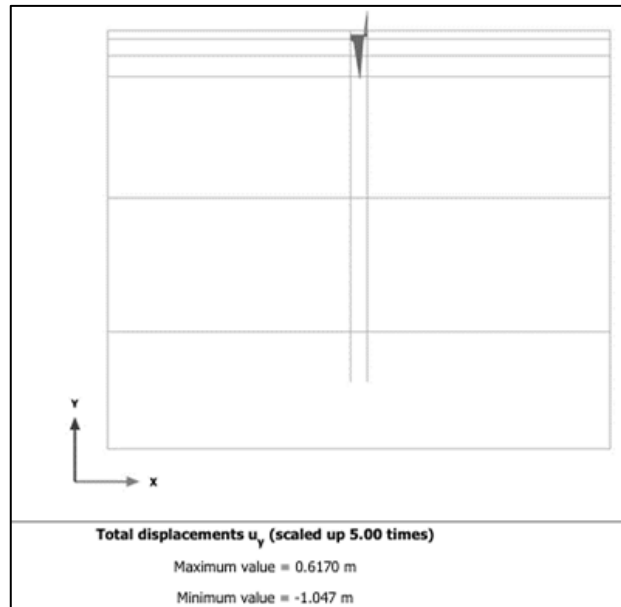
(Sumber; Penulis, 2026)

3.4 Deformasi pada Fondasi

Untuk mengetahui deformasi terjadinya kenaikan pada area fondasi dapat menggunakan *finite element method*. Finite element method digunakan untuk menganalisis kenaikan fondasi dengan cara mensimulasikan interaksi tanah dan struktur secara numerik, sehingga dapat diketahui besarnya deformasi, gaya angkat, serta stabilitas fondasi terhadap kondisi uplift. Dengan demikian, penggunaan *finite element method* sangat membantu dalam menghasilkan desain fondasi yang lebih aman.



Gambar 3. Finite Element Method Fondasi Diameter 0.6 Meter



Gambar 4. Finite Element Method Fondasi Diameter 1 Meter

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perbesaran dimensi pada fondasi tiang pancang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kenaikan yang terjadi. Pada kondisi rencana dengan diameter awal 0.6 meter mengalami kenaikan setinggi 2.207 meter. Setelah dilakukan perbesaran dimensi pada fondasi tiang pancang mengalami penurunan yang signifikan yaitu menjadi sebesar 0.6170 meter.

DAFTAR PUSTAKA

- Aljawarneh, S., Aldwairi, M., & Yassein, M. B. (2018). Anomaly-based intrusion detection system through feature selection analysis and building hybrid efficient model. *Journal of Computer Science*, 25(1), 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.03.006>
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNi 8460:2017 Persyaratan perencanaan geoteknik*.
- Chen, S., & Zhang, J. (2021). Influence of pile diameter on the mechanisms of pile-soil interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(9), 04021088.
- Choudhary, N. K., & Dutta, R. K. (2022). Pullout capacity of rough and smooth model piles in sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(3), 312–325
- Das, B. M. (2010). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Fang, J., Lin, S., & Liu, K. (2023). Multi-scale study of load-bearing mechanism of uplift piles based on model tests and numerical simulations. *Scientific Reports*, 13(1), 6410. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33221-z>
- Firdaus, M., & Ruspriansyah. (2025). Penentuan faktor keamanan fondasi kelompok tiang pada abutment jembatan di tanah lempung kaku. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 9(2), 142–150.
- Hisan, F. K., et al. (2024). Analisis pengaruh dimensi terhadap daya dukung fondasi pada lapisan lensa batuan. *Jurnal Teslink: Teknik Sipil dan Lingkungan*, 6(1), 12–22.
- Rifai, A., & Kurniadi, T. S. (2023). Analisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap penurunan dan daya dukung pondasi dalam. *Jurnal Teknik Sipil dan Geoteknik*, 4(1), 12–24.
- Sibuea, H. O. J., Fansuri, M. H., & Siagian, G. A. (2025). Perbandingan daya dukung fondasi berbasis data SPT dan PDA test (Studi kasus: Proyek RS PON). *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(2), 147–155. <https://doi.org/10.21009/jmenara.v20i2>
- Setiawan, B., & Pratama, R. (2023). Studi numerik pengaruh kenaikan muka air tanah terhadap tekanan air pori dan stabilitas fondasi dalam. *Jurnal Infrastruktur dan Lingkungan*, 5(2), 78–89.
- Thorne, R. B., & Williams, L. M. (2021). Numerical analysis of large diameter piles under complex loading conditions. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 11(2), 88–103.
- Yulianti, Y., Handiman, I., Gusnadi, Z., Sarifah, F., & Nursani, R. (2025). Analisis kapasitas lateral fondasi tiang pancang dengan metode Broms dan metode P-Y. *AKSELERASI: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 7(2), 28–39.
- Zhang, L., Wang, X., & Liu, Y. (2022). Analysis of uplift piles under high groundwater level conditions. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(5), 1402–1415.