



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 280-290
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Dangkal dan Pondasi Dalam Diatas Tanah Lunak

Shobibur Rohman Zen^{1*}, Muhammad Edy Saputro², Rifqi Brilyant Arief³

¹⁻³ Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Email: shobiburrohmanzen6@gmail.com¹

Article Info :

Received:
19-04-2026
Revised:
17-05-2026
Accepted:
02-06-2026

Abstract

Soft soil in the Kaligawe Road area of Semarang is characterized by low bearing capacity and high compressibility, posing significant challenges in foundation planning for buildings. This study analyzes the bearing capacity and primary consolidation settlement of shallow foundations (spread footing) and deep foundations (pile foundation) on soft soil using SPT data from borehole BH-06 up to 60 m depth. Bearing capacity calculations were performed using the Meyerhof (1956) method for shallow foundations and the Meyerhof (1976) method for deep foundations, while primary consolidation settlement was calculated based on Terzaghi's consolidation theory with parameters $C_c = 0.334$ and $e_0 = 1.347-1.410$. The results indicate that the bearing capacity of deep foundations increases consistently with depth and pile diameter, with skin friction dominating the total bearing capacity. A settlement comparison at equivalent allowable bearing capacity values shows that shallow foundations produce the largest settlement (average $S_c = 0.093$ m), followed by deep foundations in a 2×2 configuration (average $S_c = 0.063$ m), while deep foundations in a 2×1 configuration yield the smallest settlement (average $S_c = 0.037$ m). Therefore, the 2×1 pile configuration is recommended as the most optimal foundation system for soft soil conditions at the study location.

Keywords: *Bearing Capacity, Meyerhof Method, Consolidation Settlement, Shallow Foundation, Soft Soil.*

Abstrak

Tanah lunak di kawasan Jalan Kaligawe Semarang memiliki daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi, sehingga menimbulkan tantangan dalam perencanaan pondasi bangunan. Penelitian ini menganalisis kapasitas daya dukung dan penurunan konsolidasi primer pondasi dangkal (pondasi telapak) dan pondasi dalam (tiang pancang) pada tanah lunak menggunakan data uji SPT titik BH-06 hingga kedalaman 60 m. Perhitungan daya dukung menggunakan metode Meyerhof (1956) untuk pondasi dangkal dan metode Meyerhof (1976) untuk pondasi dalam, sedangkan penurunan konsolidasi primer dihitung berdasarkan teori konsolidasi Terzaghi dengan parameter $C_c = 0,334$ dan $e_0 = 1,347-1,410$. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung pondasi dalam meningkat seiring bertambahnya kedalaman dan diameter tiang, dengan tahanan selimut (skin friction) mendominasi kapasitas dukung total. Perbandingan penurunan pada nilai kapasitas dukung ijin yang setara menunjukkan pondasi dangkal menghasilkan penurunan terbesar (rata-rata $S_c = 0,093$ m), diikuti pondasi dalam konfigurasi 2×2 (rata-rata $S_c = 0,063$ m), dan pondasi dalam konfigurasi 2×1 sebagai yang terkecil (rata-rata $S_c = 0,037$ m). Oleh karena itu, pondasi dalam konfigurasi 2×1 direkomendasikan sebagai pilihan paling optimal pada kondisi tanah lunak di lokasi penelitian.

Kata kunci: Daya Dukung, Metode Meyerhof, Penurunan Konsolidasi, Pondasi Dangkal, Tanah Lunak.



©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

Perkembangan infrastruktur global dalam dua dekade terakhir menunjukkan kecenderungan peningkatan pembangunan pada wilayah dengan kondisi geoteknik yang kompleks, khususnya tanah lunak yang memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi dan kapasitas daya dukung rendah, sehingga menuntut pendekatan analisis yang semakin presisi dan adaptif terhadap ketidakpastian perilaku tanah. Transformasi metode analisis dari pendekatan empiris menuju integrasi numerik dan berbasis data lapangan telah memperluas cakupan evaluasi kinerja pondasi, baik pondasi dangkal maupun pondasi dalam, terutama dalam konteks interaksi tanah-struktur yang bersifat nonlinier dan bergantung waktu. Kajian klasik mengenai batas penurunan yang diizinkan masih menjadi fondasi konseptual penting

dalam perencanaan geoteknik modern, terutama dalam memahami hubungan antara deformasi dan keamanan struktur, sebagaimana ditegaskan dalam studi awal mengenai allowable settlement yang menekankan pentingnya kontrol deformasi dalam desain pondasi pada tanah lunak (Bjerrum, 1963).

Literatur kontemporer menunjukkan adanya perkembangan signifikan dalam metode estimasi daya dukung dan penurunan, terutama melalui integrasi data uji lapangan seperti CPTu dan SPT dengan pendekatan analitis maupun numerik. Interpretasi data CPTu telah digunakan untuk memprediksi penurunan konsolidasi primer secara lebih akurat dengan mempertimbangkan distribusi tekanan pori dan parameter deformasi tanah secara in-situ, sementara pendekatan numerik berbasis pemodelan elemen hingga memungkinkan simulasi respons tanah lunak terhadap beban pondasi secara lebih komprehensif (Elvirandra et al., 2024).

Pengembangan metode klasik seperti teori Terzaghi dan Meyerhof masih digunakan secara luas dalam estimasi kapasitas daya dukung pondasi dangkal, meskipun seringkali menghasilkan variasi nilai yang signifikan akibat asumsi homogenitas tanah yang tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan (Aisah & Dhiniati, 2023). Penelitian lain menunjukkan bahwa kedalaman pondasi memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan kapasitas daya dukung, namun hubungan tersebut tidak selalu linear akibat pengaruh stratifikasi tanah (Lestari & Karim, 2023). Meskipun terdapat kemajuan metodologis, kajian terdahulu menunjukkan adanya inkonsistensi dalam hasil prediksi antara pendekatan empiris, analitis, dan numerik, khususnya pada tanah lunak yang memiliki perilaku viskoelastik dan sangat sensitif terhadap perubahan tegangan efektif. Relasi antara waktu dan kompresibilitas tanah masih menjadi tantangan konseptual yang belum sepenuhnya terintegrasi dalam model prediktif, terutama dalam konteks penurunan jangka panjang akibat konsolidasi sekunder (Mesri & Godlewski, 2021).

Reinterpretasi terhadap grafik klasik yang digunakan dalam estimasi penurunan menunjukkan bahwa pendekatan konvensional seringkali menyederhanakan kompleksitas interaksi tegangan-regangan dalam tanah lunak (Christian & Carrier, 2018). Selain itu, pendekatan eksperimental seperti stabilisasi tanah menggunakan bahan tambahan menunjukkan peningkatan daya dukung, namun hasilnya sangat bergantung pada kondisi spesifik material dan lingkungan sehingga sulit digeneralisasi (Murtadha et al., 2025). Keterbatasan lain yang menonjol dalam literatur adalah kurangnya integrasi komprehensif antara analisis daya dukung dan penurunan dalam satu kerangka evaluasi yang terpadu, khususnya dalam membandingkan kinerja pondasi dangkal dan pondasi dalam pada kondisi tanah lunak yang sama. Sebagian besar penelitian cenderung berfokus pada salah satu aspek secara terpisah, sehingga menghasilkan pemahaman yang parsial terhadap perilaku sistem pondasi secara keseluruhan. Studi terbaru mengenai evaluasi teknis dan efisiensi material menunjukkan bahwa pemilihan jenis pondasi tidak hanya dipengaruhi oleh kapasitas daya dukung, tetapi juga oleh faktor efisiensi konstruksi dan karakteristik deformasi tanah yang kompleks (Dharmayasa et al., 2026).

Kondisi ini mengindikasikan adanya kebutuhan mendesak untuk pendekatan analisis yang mampu mengintegrasikan berbagai parameter geoteknik secara simultan. Urgensi penelitian ini semakin menguat ketika mempertimbangkan implikasi praktis dari kegagalan pondasi pada tanah lunak yang tidak hanya berdampak pada kerusakan struktural, tetapi juga kerugian ekonomi yang signifikan serta potensi risiko keselamatan. Ketidakakuratan dalam estimasi daya dukung dan penurunan dapat menyebabkan overdesign yang tidak efisien atau underdesign yang berisiko tinggi terhadap kegagalan struktur. Kompleksitas perilaku tanah lunak yang dipengaruhi oleh kondisi drainase, sejarah tegangan, dan karakteristik material menuntut adanya pendekatan analisis yang lebih holistik dan berbasis data empiris yang tervalidasi. Integrasi antara metode klasik, data lapangan, dan simulasi numerik menjadi kebutuhan ilmiah yang tidak dapat diabaikan untuk meningkatkan reliabilitas desain pondasi.

Penelitian ini memposisikan diri sebagai upaya untuk mengisi celah konseptual dan empiris dalam analisis daya dukung dan penurunan pondasi pada tanah lunak melalui pendekatan komparatif yang sistematis antara pondasi dangkal dan pondasi dalam. Fokus utama penelitian diarahkan pada pengembangan kerangka analisis terpadu yang mampu mengakomodasi variasi parameter tanah serta mengintegrasikan hasil perhitungan dari berbagai metode yang relevan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi secara kritis kinerja kedua jenis pondasi dalam kondisi tanah lunak serta memberikan kontribusi teoretis dalam pengayaan model analisis geoteknik dan kontribusi metodologis melalui pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif dan aplikatif dalam praktik rekayasa sipil.

METODE PENELITIAN

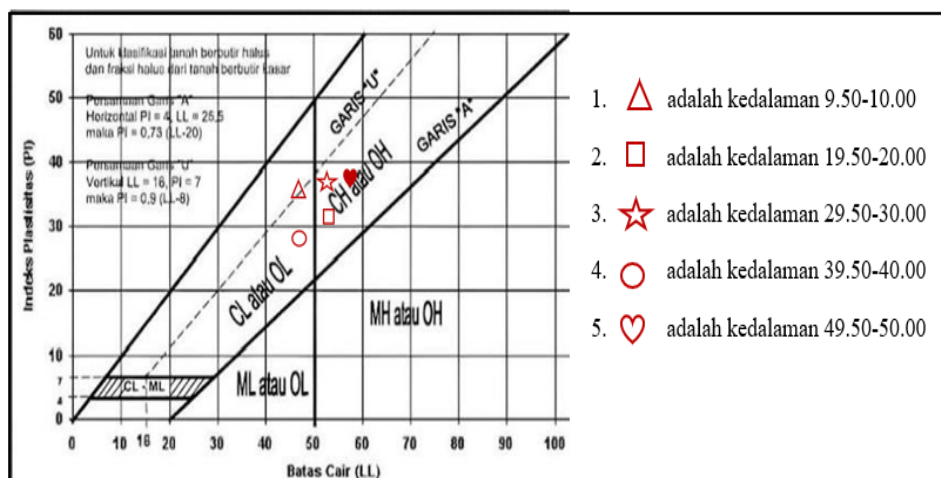
Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus yang berlokasi di kawasan Jalan Kaligawe, Semarang, yang secara geoteknik dikenal memiliki dominasi lapisan tanah lunak dengan karakteristik daya dukung rendah dan tingkat kompresibilitas tinggi, sehingga menghadirkan kompleksitas signifikan dalam perencanaan pondasi. Pemilihan lokasi dilakukan secara purposif dengan mempertimbangkan relevansi kondisi tanah terhadap fokus penelitian, yakni evaluasi kinerja pondasi dangkal dan pondasi dalam. Kerangka metodologis yang digunakan menitikberatkan pada pendekatan analisis komparatif untuk mengkaji perbedaan kinerja teknis kedua sistem pondasi dalam konteks parameter daya dukung dan penurunan tanah. Data yang digunakan sepenuhnya merupakan data sekunder yang diperoleh melalui studi literatur dari berbagai sumber ilmiah dan standar teknis seperti SNI dan ASTM, serta data investigasi lapangan berupa laporan penyelidikan tanah pada titik bor BH-06 hingga kedalaman 60 meter yang mencakup log bor dan hasil uji Standard Penetration Test (N-SPT), dilengkapi dengan data laboratorium mekanika tanah seperti kadar air, berat jenis, batas Atterberg, uji triaxial, dan uji konsolidasi sebagai dasar dalam penentuan parameter geoteknik (ASTM, 2017).

Tahapan analisis dimulai dengan pengolahan parameter tanah melalui klasifikasi sistem USCS, interpretasi nilai N-SPT untuk menentukan konsistensi tanah, serta estimasi parameter kuat geser dan karakteristik pemampatan tanah. Perhitungan kapasitas daya dukung pondasi dangkal dilakukan menggunakan metode Meyerhof (1956), sedangkan pondasi dalam dianalisis dengan pendekatan Meyerhof (1976) dengan memanfaatkan korelasi nilai kohesi tanah (C_u) terhadap data N-SPT. Analisis penurunan difokuskan pada penurunan konsolidasi primer dengan mengacu pada Teori Konsolidasi Satu Dimensi Terzaghi (1943), yang memungkinkan evaluasi deformasi tanah akibat beban secara bertahap dalam fungsi waktu. Seluruh proses perhitungan dilakukan secara sistematis dan ditunjang dengan penggunaan perangkat lunak Microsoft Excel untuk meningkatkan akurasi tabulasi serta memfasilitasi analisis perbandingan kinerja teknis antara kedua jenis pondasi secara kuantitatif dan terukur (Kristiadi et al., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Tanah dan Daya Dukung Pondasi Dangkal

Hasil pengujian laboratorium memperoleh nilai mengenai sifat fisik tanah, khususnya nilai Atterberg Limits yang meliputi Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL), dan Plasticity Index (PI) pada beberapa kedalaman tanah. Berdasarkan hasil pengujian, nilai LL berkisar antara 49,48%–58,92%, nilai PL antara 18,29%–22,64%, serta nilai PI antara 29,24%–36,29%. Data hasil pengujian ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan klasifikasi tanah menggunakan sistem *Unified Soil Classification System* (USCS) melalui analisis Grafik Plastisitas Casagrande. Grafik tersebut menunjukkan posisi titik koordinat sampel tanah pada masing-masing kedalaman sehingga dapat diketahui jenis dan karakteristik tanah di lokasi penelitian (Dharmayasa et al., 2026).



Gambar 1. Grafik Plastisitas Casagrande

Berdasarkan hasil analisis klasifikasi tanah pada titik BM-06 di lokasi pembangunan Jalan

Kaligawe, Semarang, diperoleh bahwa lapisan tanah pada kedalaman 9,50–10,00 m dan 39,50–40,00 m termasuk kelompok CL (Lean Clay), yaitu lempung anorganik dengan plastisitas rendah hingga sedang. Sementara itu, pada kedalaman 19,50–20,00 m, 29,50–30,00 m, dan 49,50–50,00 m tanah diklasifikasikan sebagai CH (*Fat Clay*), yaitu lempung anorganik dengan plastisitas tinggi. Keberadaan dominan lapisan Fat Clay (CH) ini mengindikasikan bahwa tanah di lokasi penelitian memiliki nilai batas cair (*Liquid Limit/LL*) yang tinggi serta indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*) yang besar, sehingga tanah cenderung memiliki kemampuan menyerap air yang signifikan, kompresibilitas yang tinggi, serta sangat rentan terhadap potensi perubahan volume atau penurunan (*settlement*) jangka panjang yang besar saat menerima beban struktur di atasnya. Berikut adalah tabel hasil analisis klasifikasi tanah pada titik BM-06 berdasarkan sistem USCS yang dapat disajikan pada bagian analisis data tanah:

Tabel 1. Hasil Penyelidikan Tanah Klasifikasi USCS Titik BM-06

No	Kedalaman (m)	Simbol USCS	Nama Tanah (USCS)
1	9.50 – 10.00	CL	Lean Clay Lempung plastisitas rendah sampai sedang
2	19.50 – 20.00	CH	Fat Clay Lempung plastisitas sangat tinggi
3	29.50 – 30.00	CH	Fat Clay Lempung plastisitas sangat tinggi
4	39.50 – 40.00	CL	Lean Clay Lempung plastisitas rendah sampai sedang

Hasil pengujian struktur tanah di lokasi penelitian merujuk pada uji SPT dimana pengujian SPT dilakukan pada setiap interval kedalaman 2 meter hingga mencapai kedalaman akhir 60 meter menggunakan alat *Automatic Hammer* yang memiliki efisiensi energi sebesar 80%. Nilai lapangan yang diperoleh kemudian dikonversikan ke nilai standar N_{55} dan N_{60} sesuai dengan nilai efisiensi energi yang digunakan di dalam rumus koreksi. Sebagai contoh, untuk nilai SPT lapangan sebesar 8, hasil konversi nilai SPT ke N_{55} dihitung secara matematis melalui persamaan $N_{55} = 8 \times \frac{80}{55} = 11,64$

Hasil analisis kapasitas daya dukung ijin tanah (q_a) dan daya dukung ijin pondasi (Q_a) untuk pondasi dangkal yang dihitung menggunakan korelasi empiris metode Meyerhof (1956) dari data pengujian N-SPT menunjukkan adanya peningkatan kapasitas seiring dengan bertambahnya dimensi lebar pondasi (B) dan kedalaman pondasi (D). Sebagai contoh, pada kedalaman pondasi 1 m dengan dimensi lebar 1 m x 1 m, nilai daya dukung ijin tanah yang dihasilkan adalah sebesar 309,53 kN/m² dengan kapasitas daya dukung ijin pondasi sebesar 309,53 kN. Hasil data yang diperoleh juga menunjukkan bahwa nilai $q_a = 309,53$ kN/m² muncul secara berulang pada beberapa kombinasi dimensi dan kedalaman tertentu. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kapasitas daya dukung tanah telah mencapai nilai yang relatif konstan dan lebih dipengaruhi oleh karakteristik lapisan tanah setempat berdasarkan distribusi nilai N-SPT di lapangan. Dominasi tanah kohesif berupa lempung lunak, seperti *lean clay* dan *fat clay*, menyebabkan peningkatan kapasitas daya dukung ultimit tidak terjadi secara signifikan meskipun dimensi pondasi diperbesar, karena kemampuan dukung tanah tetap dibatasi oleh resistensi alami tanah pendukung tersebut. Berikut adalah data hasil analisis rekapitulasi daya dukung pondasi dangkal :

Tabel 2. Rekapitulasi Daya Dukung Pondasi Dangkal

Df m	B m	SPT	N55	Kd	F1	F2	F3	q_a kN/m ²	Q_a kN
0,5	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
0,5	1	8	11,64	1,17	0,05	0,08	0,3	271,13	271,13
0,5	1,5	8	11,64	1,11	0,05	0,08	0,3	232,49	523,11

0,5	2	8	11,64	1,08	0,05	0,08	0,3	208,23	832,93
0,75	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
0,75	1	8	11,64	1,25	0,05	0,08	0,3	290,33	290,33
0,75	1,5	8	11,64	1,17	0,05	0,08	0,3	244,01	549,03
0,75	2	8	11,64	1,12	0,05	0,08	0,3	216,17	864,67
1	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
1	1	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	309,53
1	1,5	8	11,64	1,22	0,05	0,08	0,3	255,53	574,95
1	2	8	11,64	1,17	0,05	0,08	0,3	224,10	896,41
1,2	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
1,2	1	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	309,53
1,2	1,5	8	11,64	1,26	0,05	0,08	0,3	264,75	595,69
1,2	2	8	11,64	1,20	0,05	0,08	0,3	230,45	921,81
1,5	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
1,5	1	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	309,53
1,5	1,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	278,57	626,79
1,5	2	8	11,64	1,25	0,05	0,08	0,3	239,97	959,89
2	0,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	77,38
2	1	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	309,53	309,53
2	1,5	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	278,57	626,79
2	2	8	11,64	1,33	0,05	0,08	0,3	255,84	1023,37

Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Metode Meyerhof

Analisis kapasitas daya dukung tiang pancang tunggal tipe spun pile pada titik Bore Hole 6 (BH-6) dilakukan menggunakan metode empiris Meyerhof (1976) dengan meninjau tiang berdiameter (d) 60 cm pada kedalaman rencana (L) sebesar 6 m. Berdasarkan hasil pengujian lapangan, nilai N-SPT pada kedalaman tersebut sebesar 1, yang menunjukkan bahwa lapisan tanah didominasi oleh tanah kohesif dengan konsistensi sangat lunak. Melalui korelasi empiris terhadap nilai N-SPT, diperoleh nilai kohesi undrained tanah (c_u) sebesar 6,67 kN/m², sehingga nilai tegangan geser selimut tiang (τ) juga sebesar 6,67 kN/m². Dengan luas penampang ujung tiang (A_p) sebesar 0,2826 m² dan koefisien empiris Meyerhof untuk tanah kohesif sebesar 9, diperoleh kapasitas daya dukung ujung tiang (Q_p) sebesar 65 kN (Sari & Nugroho, 2021).

Komponen tahanan geser selimut atau akumulasi daya dukung selimut tiang (Q_s cumulative) memberikan kontribusi yang lebih dominan, yaitu sebesar 276,79 kN dengan keliling tiang 1,256 m. Penjumlahan kapasitas daya dukung ujung tiang dan tahanan geser selimut menghasilkan nilai kapasitas daya dukung ultimit tiang tunggal (Q_{ult}) sebesar 341,78 kN. Dengan menerapkan faktor keamanan (Safety Factor) sebesar 3 untuk mengantisipasi ketidakpastian kondisi tanah bawah permukaan, diperoleh kapasitas daya dukung izin tiang (Q_a) sebesar 113,93 kN. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa pada kondisi tanah lunak di titik BH-6, mekanisme transfer beban struktur lebih didominasi oleh tahanan geser selimut (friction pile) dibandingkan tahanan ujung tiang (end bearing pile). Karakteristik tersebut akan berubah seiring variasi diameter tiang, mulai dari 0,2 m hingga 0,6 m (Dharmayasa et al., 2026).

Variasi dimensi diameter penampang tiang pancang tunggal (spun pile) yang digunakan mulai dari 0,2 m hingga 0,6 m menghasilkan peningkatan kapasitas daya dukung pondasi secara konsisten dan signifikan. Fenomena teknis ini dipicu langsung oleh pembesaran luas selimut penampang lateral serta luas penampang ujung tiang, yang secara linear meningkatkan akumulasi nilai tahanan selimut (Q_s) dan tahanan ujung tiang (Q_p). Karakteristik data pada seluruh variasi diameter tersebut juga menunjukkan sifat mekanika tanah yang serupa, di mana komponen tahanan selimut lateral (Q_s) secara konstan mendominasi total kapasitas dukung ultimit dibandingkan kontribusi tahanan ujungnya (Q_p). Hal ini menegaskan bahwa penggunaan variasi diameter yang lebih besar pada formasi tanah lunak ini sangat efektif dalam mendistribusikan beban struktural melalui mekanisme friction pile (Rohmahillah et al., 2025; Kristiyanto & Purwoko, 2022).

Penurunan Konsolidasi Primer Pondasi Dangkal dan Pondasi Dalam

Berdasarkan parameter tanah yang telah diperoleh, dilakukan perhitungan konsolidasi primer pondasi dangkal pada tanah lunak. Perhitungan ini menunjukkan berapa besar penurunan yang akan terjadi pada pondasi tersebut. Berikut adalah contoh perhitungan konsolidasi pondasi dangkal: Berikut dibawah adalah rekapitulasi hasil dari perhitungan konsolidasi primer pondasi dangkal.

Tabel 3. Rekapitulasi dari konsolidasi primer

Df	B	L	Cc	Hc	eo	Depth	Po	Pt	Pm	Pb	ΔPav	Sc
m	m	m		m		m	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	m
0,5												-
0,5	1	1	0,334	7	1,347	5,25	43,37	13,3	7,53	4,82	4,290	0,041
0,5	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,00	55,08	20,9	7,68	3,95	5,428	0,061
0,5	2	2	0,334	14	1,347	8,75	66,78	27,5	7,55	3,46	6,426	0,079
0,75												-
0,75	1	1	0,334	7	1,347	5,38	44,20	16,0	8,78	5,52	5,063	0,047
0,75	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,13	55,91	24,3	8,57	4,33	6,208	0,068
0,75	2	2	0,334	14	1,347	8,88	67,62	31,3	8,23	3,71	7,220	0,088
1												-
1	1	1	0,334	7	1,347	5,50	45,04	19,3	10,2	6,31	5,982	0,054
1	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,25	56,75	28,3	9,57	4,75	7,119	0,077
1	2	2	0,334	14	1,347	9,00	68,46	35,8	8,96	3,98	8,134	0,097
1,2												-
1,2	1	1	0,334	7	1,347	5,60	45,71	21,4	11,0	6,69	6,525	0,058
1,2	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,35	57,42	32,2	10,4	5,10	7,962	0,084
1,2	2	2	0,334	14	1,347	9,10	69,12	40,0	9,59	4,20	8,969	0,106
1,5												-
1,5	1	1	0,334	7	1,347	5,75	46,71	25,2	12,3	7,32	7,496	0,064
1,5	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,50	58,42	39,1	11,9	5,68	9,464	0,097
1,5	2	2	0,334	14	1,347	9,25	70,13	47,4	10,6	4,56	10,43	0,120
2												-
2	1	1	0,334	7	1,347	6,00		34,3	15,2	8,59	9,713	0,079
2	1,5	1,5	0,334	10,5	1,347	7,75	48,39	92	8	8	11,86	0,117
							60,09	51,1	13,7	6,26		
							7	67	5	8		

							71,80	63,9	12,6	5,22		
2	2	2	0,334	14	1,347	9,50	5	61	3	1	13,63	0,150

Berdasarkan hasil perhitungan konsolidasi primer pondasi dangkal yang telah dilakukan dengan variasi kedalaman pondasi ($D = 0,5 \text{ m}, 0,75 \text{ m}, 1,0 \text{ m}, 1,2 \text{ m}, 1,5 \text{ m}, \text{ dan } 2,0 \text{ m}$) serta dimensi pondasi ($B \times L = 0,5 \times 0,5 \text{ m}, 1 \times 1 \text{ m}, 1,5 \times 1,5 \text{ m}, \text{ dan } 2 \times 2 \text{ m}$), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut. Pertama, nilai penurunan konsolidasi primer (S_c) yang diperoleh dari seluruh variasi menunjukkan rentang antara $0,041 \text{ m}$ hingga $0,150 \text{ m}$ ($4,1 \text{ cm} - 15,0 \text{ cm}$). Nilai ini dihitung menggunakan parameter tanah yang seragam yakni indeks kompresi $C_c = 0,334$ dan angka pori awal $e_0 = 1,347$, yang mencerminkan karakteristik tanah lempung lunak dengan kompresibilitas sedang hingga tinggi (Aisah, 2023; Rangките, 2024; Nugroho, 2022).

Kedua, penurunan konsolidasi primer berbanding lurus dengan dimensi pondasi. Semakin besar ukuran pondasi ($B \times L$), semakin besar pula penurunan yang terjadi. Hal ini dibuktikan dari data pada setiap kedalaman yang sama, di mana pondasi berukuran $2 \times 2 \text{ m}$ selalu menghasilkan S_c lebih besar dibandingkan pondasi $1,5 \times 1,5 \text{ m}$ dan $1 \times 1 \text{ m}$. Sebagai contoh pada kedalaman $D = 2,0 \text{ m}$, nilai S_c untuk pondasi $1 \times 1 \text{ m}$ adalah $0,079 \text{ m}$, meningkat menjadi $0,117 \text{ m}$ untuk pondasi $1,5 \times 1,5 \text{ m}$, dan mencapai $0,150 \text{ m}$ untuk pondasi $2 \times 2 \text{ m}$ (Putri et al., 2022; Azzahra, 2022; Rangките, 2024).

Ketiga, penurunan konsolidasi primer juga meningkat seiring bertambahnya kedalaman pondasi pada dimensi yang sama. Hal ini terjadi karena semakin dalam pondasi, tegangan overburden efektif (P_o) semakin besar sehingga rasio tegangan akhir terhadap tegangan awal (P_t/P_o) yang mempengaruhi nilai dalam rumus S_c turut meningkat. Nilai S_c terbesar terjadi pada kombinasi kedalaman pondasi $D = 2,0 \text{ m}$ dengan dimensi $B \times L = 2 \times 2 \text{ m}$, yakni sebesar $0,150 \text{ m}$ ($15,0 \text{ cm}$). Sementara nilai S_c terkecil terjadi pada kedalaman $D = 0,5 \text{ m}$ dengan dimensi $B \times L = 1 \times 1 \text{ m}$, yakni sebesar $0,041 \text{ m}$ ($4,1 \text{ cm}$) (Prasetyo, 2023).

Keempat, berdasarkan standar toleransi penurunan pondasi tapak pada umumnya (penurunan izin $\leq 25 \text{ mm}$ untuk struktur sensitif dan $\leq 50 \text{ mm}$ untuk struktur umum), maka seluruh nilai S_c yang diperoleh melebihi batas toleransi penurunan izin, khususnya untuk dimensi pondasi $1,5 \times 1,5 \text{ m}$ dan $2 \times 2 \text{ m}$. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanah dasar pada lokasi perencanaan memerlukan perbaikan tanah atau pertimbangan penggunaan pondasi dalam guna mereduksi penurunan konsolidasi yang berlebihan (Azzahra, 2022).

Penurunan konsolidasi primer pondasi dalam merupakan salah satu parameter paling kritis dalam menentukan kelayakan sistem pondasi. Proses pemampatan jangka panjang ini terjadi akibat keluarnya air pori secara perlahan dari dalam tanah lempung yang memiliki permeabilitas rendah. Menggunakan teori konsolidasi Terzaghi dengan parameter indeks kompresi C_c sebesar $0,334$ dan angka pori awal e_0 berkisar antara $1,347$ hingga $1,410$, perhitungan penurunan dilakukan pada kelompok tiang pancang untuk meninjau efektivitas transfer beban struktur melewati lapisan tanah kompresibel.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa besarnya penurunan konsolidasi primer (S_c) pada pondasi dalam sangat dipengaruhi oleh konfigurasi susunan tiang, diameter, serta kedalaman penetrasinya. Pada konfigurasi kelompok tiang susunan 2×1 dengan variasi diameter $0,2 \text{ m}$ hingga $0,6 \text{ m}$ dan kedalaman tertanam antara 16 m hingga 30 m , diperoleh nilai penurunan yang relatif kecil, yaitu berkisar antara $0,031 \text{ m}$ hingga $0,078 \text{ m}$. Karakteristik penurunan yang rendah ini membuktikan bahwa tiang yang tertanam lebih dalam mampu mengoptimalkan komponen tahanan selimut (*skin friction*) untuk mereduksi tambahan tegangan vertikal (ΔP_{av}) yang diterima oleh lapisan lempung di bawahnya.

Analisis pada pondasi dalam dengan konfigurasi kelompok tiang 2×2 menunjukkan nilai penurunan yang sedikit lebih besar, yakni berada pada rentang $0,049 \text{ m}$ hingga $0,076 \text{ m}$. Meskipun jumlah tiang dalam kelompok lebih banyak, kedalaman penetrasi tiang pada variasi konfigurasi ini umumnya lebih dangkal sehingga beban kelompok tiang disebarkan pada area yang lebih luas dan masih berada di dalam lapisan tanah dengan indeks pemampatan tinggi. Walaupun demikian, kedua tipe konfigurasi pondasi dalam ini terbukti jauh lebih aman dan efektif dalam mereduksi risiko penurunan jika dibandingkan dengan penggunaan pondasi dangkal yang menghasilkan rata-rata penurunan terbesar hingga mencapai $0,093 \text{ m}$.

Perbandingan Penurunan Pondasi dangkal dan pondasi dalam

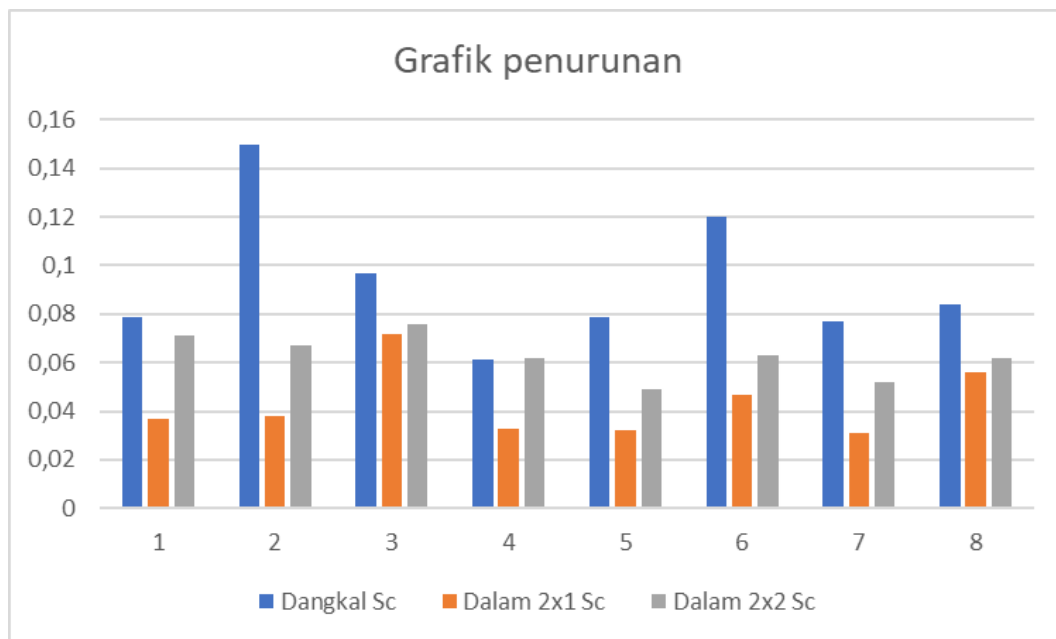
Berdasarkan rekapitulasi hasil perhitungan di atas, dilakukan analisis komparatif terhadap beberapa variasi tipe pondasi yang dipilih berdasarkan kesetaraan nilai kapasitas dukung ijin (Q_a).

Analisis ini difokuskan pada perbandingan nilai penurunan konsolidasi primer untuk menentukan jenis pondasi yang paling optimal dan representatif, meskipun terdapat perbedaan pada dimensi serta kedalaman penetrasinya. Ringkasan hasil perbandingan parameter tersebut disajikan secara mendetail pada Tabel 4.28 berikut:

Tabel 4. Perbandingan Penurunan Pondasi

No	Qa kN	Pondasi Dangkal			Pondasi Dalam (2x1)			Pondasi Dalam (2x2)		
		B m	Df m	Sc m	D m	L m	Sc m	D m	L m	Sc m
1	832,9	2,0	0,5	0,079	0,5	30	0,037	0,6	14,0	0,071
2	1023,4	2,0	2,0	0,150	0,5	30	0,038	0,5	18,0	0,067
3	626,8	1,5	1,5	0,097	0,6	16	0,078	0,6	10,0	0,076
4	523,1	1,5	0,5	0,061	0,4	26	0,033	0,45	12,0	0,062
5	309,5	1,0	2,0	0,079	0,3	20	0,032	0,2	14,0	0,050
6	959,9	2,0	1,5	0,120	0,5	30	0,042	0,5	18,0	0,063
7	575,0	1,5	1,0	0,077	0,4	28,0	0,031	0,3	18,0	0,052
8	595,7	1,5	1,2	0,084	0,55	20,0	0,056	0,5	14,0	0,062

Dari tabel diatas untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik dibawah sebagai berikut :



Gambar 2. Grafik Penurunan Pondasi

Berdasarkan data yang disajikan, hasil analisis menunjukkan bahwa pondasi tiang pancang dengan konfigurasi 2x1 menghasilkan nilai penurunan terkecil, dengan rentang antara 0,031 m hingga 0,078 m. Rendahnya nilai penurunan ini disebabkan oleh dimensi pondasi yang lebih panjang dan tertanam lebih dalam, sehingga komponen tahanan selimut (skin friction) berperan signifikan dalam mereduksi besarnya penurunan konsolidasi yang terjadi (Rangkite, 2024). Berdasarkan hasil perhitungan penurunan konsolidasi primer pada 8 titik pengamatan, pondasi dangkal menghasilkan penurunan terbesar dengan rata-rata $Sc = 0,093$ m karena beban langsung bertumpu pada lapisan tanah lunak di dekat permukaan sehingga tekanan tambahan yang diterima lapisan lempung sangat besar, sementara pondasi dalam 2x2 menghasilkan penurunan menengah dengan rata-rata $Sc = 0,063$ m akibat distribusi beban kelompok tiang yang lebih luas justru memperbesar tekanan pada lapisan konsolidasi di bawahnya.

Sedangkan pondasi dalam 2×1 terbukti paling optimal dengan penurunan terkecil rata-rata $S_c = 0,043$ m karena konfigurasi tiang yang lebih ramping dengan kedalaman 16–30 m mampu memindahkan beban secara efektif melewati lapisan tanah lunak menuju lapisan tanah keras di bawahnya, sehingga dari ketiga alternatif yang dibandingkan, pondasi dalam 2×1 adalah pilihan yang paling aman dan direkomendasikan untuk diterapkan pada kondisi tanah lunak di lokasi penelitian ini (Putri et al., 2022).

Pada urutan kedua, pondasi dalam dengan konfigurasi 2×2 menunjukkan nilai penurunan yang lebih besar dibandingkan konfigurasi 2×1 , namun masih lebih rendah daripada pondasi dangkal. Rentang penurunan pada variasi ini berkisar antara 0,049 m hingga 0,076 m. Besarnya penurunan pada skenario ini dipengaruhi oleh faktor efisiensi grup tiang serta kedalaman penetrasi tiang yang tidak sedalam konfigurasi sebelumnya (Prasetyo, 2023; Aisah, 2023). Pondasi dangkal mencatatkan nilai penurunan tertinggi dibandingkan kedua jenis pondasi dalam tersebut, dengan rentang nilai antara 0,061 m hingga 0,150 m. Hal ini disebabkan karena mekanisme penyaluran beban pada pondasi dangkal sepenuhnya bertumpu pada dasar pondasi (tahanan ujung), tanpa adanya bantuan dari tahanan selimut tanah di sepanjang badan fondasi. Kendati demikian, untuk penggunaan pada bangunan rumah tinggal satu lantai, nilai penurunan pondasi dangkal ini secara teknis masih dikategorikan dalam batas aman (Nugroho, 2022).

Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Dangkal dan Pondasi Dalam Diatas Tanah Lunak

Pada penelitian Rohmahillah Aviskanasya Septiandri dan Farikha Mualida Nafi Arti melakukan analisis variasi diameter tiang pancang pada perancangan pondasi rumah susun dengan menerapkan metode kuantitatif, menggunakan data SPT serta metode empiris Luciano De Court (1995) dan Meyerhof (1976), dengan pengecekan numeris melalui program Plaxis 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pondasi tiang dengan variasi diameter 0,8 m dan 1 m pada kedalaman 24 m dan 26 m memenuhi nilai keamanan (SF) untuk semua desain rencana, di mana daya dukung dihitung menggunakan metode Meyerhof dan Luciano De Court. Hal ini relevan dengan penelitian yang sedang dilakukan, yaitu analisis daya dukung pondasi dangkal dan pondasi dalam di atas tanah lunak yang berlokasi di Kaligawe, mengingat kondisi tanah lunak memerlukan perencanaan pondasi yang cermat agar mampu memikul beban struktur secara aman dan efisien, baik ditinjau dari aspek daya dukung maupun penurunan yang terjadi (Rohmahillah et al., 2025).

Pada penelitian ini, Ali Zainal Abidin Isa Alhabsyi dan Dian Solin Purnamawati melakukan studi perbandingan daya dukung dan penurunan pondasi tiang pancang dengan variasi dimensi pada struktur jembatan, menggunakan metode Nakazawa dengan variasi diameter 0,8 m, 1 m, dan 1,2 m pada kedalaman 15 m, serta analisis penurunan dengan metode Vesic secara manual dan metode elemen hingga sebagai pembanding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar diameter tiang, maka penurunan tiang tunggal juga semakin besar, namun untuk pondasi kelompok, penurunan cenderung berkurang seiring bertambahnya diameter tiang karena distribusi tegangan ke tanah menjadi lebih luas dan pemanfaatan tanah keras menjadi lebih optimal (Alhabsyi & Purnamawati, 2023).

Pada penelitian ini, Rini Trisno Lestari dan Ayu Herzanita melakukan analisis kapasitas daya dukung pondasi dangkal terhadap variasi dimensi dan kedalaman menggunakan metode Meyerhof (1963) dengan memasukkan parameter koreksi berupa faktor bentuk (shape factors) dan faktor kedalaman (depth factors). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusi tekanan tanah di atas dasar pondasi (overburden pressure) meningkat secara linear seiring bertambahnya kedalaman pondasi (Df), di mana penambahan kedalaman efektif menggeser bidang keruntuhan geser tanah (shear failure plane) ke lapisan yang lebih dalam sehingga kapasitas dukung ultimit meningkat tajam, namun efektivitas ini berkurang pada area bermuka air tanah tinggi akibat tekanan hidrostatik yang mereduksi tegangan efektif tanah. Hal ini sangat relevan dengan penelitian yang sedang dilakukan, yaitu analisis daya dukung pondasi dangkal dan pondasi dalam di atas tanah lunak di Kaligawe (Lestari & Herzanita, 2022; Aisah, 2023).

Hery Kristiyanto dan Fajar Purwoko melakukan perbandingan daya dukung dan penurunan tanah pada pondasi dangkal berdasarkan data SPT dan CPT menggunakan metode Terzaghi, dengan tujuan mengetahui besarnya kapasitas daya dukung dan penurunan tanah pada elevasi pondasi -1 meter dan -2 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung tanah berdasarkan hasil CPT memperlihatkan nilai yang lebih besar dibandingkan hasil SPT, namun keduanya menunjukkan hasil penurunan tanah yang hampir sama pada kedalaman -2 meter. Temuan ini sangat relevan dengan

penelitian yang sedang dilakukan, yaitu analisis daya dukung pondasi dangkal dan pondasi dalam di atas tanah lunak di Kaligawe, di mana penggunaan data lapangan seperti SPT dan CPT menjadi dasar penting dalam menentukan parameter tanah yang akurat, khususnya pada kondisi tanah lunak (Kristiyanto & Purwoko, 2021; Rangkite, 2024; Aisah, 2023).

Penelitian terdahulu yang telah diuraikan di atas memiliki keterkaitan yang erat dan sejalan dengan penelitian yang sedang dilakukan. Penelitian Rohmahillah dan Farikha menunjukkan bahwa pemilihan dimensi dan kedalaman pondasi sangat berpengaruh terhadap nilai keamanan struktur, sementara penelitian Ali dan Dian memperkuat bahwa variasi dimensi pondasi memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku penurunan. Penelitian Rini dan Ayu menunjukkan bahwa penambahan kedalaman pondasi mampu meningkatkan kapasitas dukung ultimit meskipun efektivitasnya berkurang pada kondisi muka air tanah tinggi, sedangkan penelitian Hery dan Fajar menegaskan pentingnya data SPT dan CPT sebagai dasar perhitungan daya dukung yang akurat. Keempat penelitian tersebut secara bersama-sama mendukung dan memperkuat landasan ilmiah penelitian yang dilakukan (Rangkite, 2024; Aisah, 2023; Azzahra, 2022).

KESIMPULAN

Profil tanah di lokasi penelitian didominasi oleh tanah kohesif berupa lempung. Variasi plastisitas tanah teridentifikasi, di mana lapisan Lean Clay (CL) ditemukan pada kedalaman 9,5–10 m dan 39,5–40 m, sedangkan sebagian besar lapisan lainnya berupa Fat Clay (CH) dengan plastisitas tinggi hingga sangat tinggi pada kedalaman 19,5–20 m, 29,5–30 m, dan 49,5–50 m. Analisis daya dukung menggunakan metode Meyerhof menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung pondasi, baik pondasi dangkal maupun pondasi dalam, meningkat seiring bertambahnya dimensi dan kedalaman pondasi. Pondasi dangkal mencapai kapasitas daya dukung izin (Q_a) maksimum sebesar 1023,37 kN pada kedalaman 2 m dengan dimensi 2×2 m, sedangkan pada pondasi tiang pancang, kontribusi tahanan selimut (Q_s) lebih dominan dibandingkan tahanan ujung (Q_p), dengan kapasitas maksimum sebesar 882,21 kN pada diameter 0,6 m dan kedalaman 40 m. Selain itu, konfigurasi pondasi dalam 2×1 menunjukkan performa terbaik dalam mereduksi penurunan, dengan nilai penurunan berkisar antara 0,031 m hingga 0,078 m karena tiang mampu menyalurkan beban hingga lapisan tanah.

Pondasi dalam konfigurasi 2×2 menunjukkan kinerja menengah dengan penurunan antara 0,049 m hingga 0,076 m, yang dipengaruhi oleh distribusi beban pada lapisan tanah dengan kompresibilitas lebih tinggi akibat kedalaman tiang yang relatif lebih dangkal. Sementara itu, pondasi dangkal menghasilkan penurunan terbesar dengan rata-rata S_c sebesar 0,093 m (9,3 cm), sehingga kurang direkomendasikan untuk tanah lunak karena berpotensi menyebabkan penurunan berlebih. Meskipun demikian, untuk bangunan sederhana seperti rumah tinggal satu lantai, nilai tersebut masih dalam batas aman. Secara keseluruhan, ditinjau dari aspek stabilitas jangka panjang dan efisiensi struktur, penggunaan pondasi dalam konfigurasi 2×1 menjadi alternatif paling optimal pada kondisi tanah lunak di lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisah, E., & Dhiniati, F. (2023). Kapasitas daya dukung pondasi dangkal dengan teori terzaghi dan mayerhof. *Konstruksia*, 15(1), 127-136. <https://doi.org/10.24853/jk.15.1.127-136>
- Bjerrum, L. (1963). *Allowable Settlement of Structures. Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 135-137.*
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design.* McGraw-Hill.
- Christian, J. T., & Carrier, W. D. (2018). Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's Chart Reinterpreted. *Canadian Geotechnical Journal.*
- Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices (2nd Edition).* Prentice Hall.
- Craig, R.F. (1997). *Soil Mechanics, Sixth Edition.* Taylor & Francis.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)* (N. E. Mochtar & I. B. Mochtar, Trans.; Jilid 1 ed.). Erlangga.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Foundation Engineering.* Cengage Learning.
- Dharmayasa, I. G. N. P., Mustajib, M. A. D., Tapa, I. G. F. S., & Indrashwara, D. C. (2026). EVALUASI TEKNIK DAN EFISIENSI MATERIAL PONDASI DANGKAL DAN DALAM PADA TANAH LEMPUNG LUNAK DI KAWASAN PARIWISATA BALI. *Jurnal Teknik Gradien*, 18(01), 107-118. <https://doi.org/10.47329/teknikgradien.v18i01.1764>

- Elvirandra, L., Fansuri, M. H., Saputra, P. D., Hasanah, M., & Asokawati, F. C. (2024). Analisis Numerik untuk Memprediksi Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Lunak dengan Daya Dukung Rendah. *Construction and Material Journal*, 6(2), 107-115. <https://doi.org/10.32722/cmj.v6i2.6519>
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall.
- Kristiadi, K., Wijaya, C. C., Wahyuni, M., & Karlinasari, R. (2022). Interpretasi hasil CPTu untuk menghitung penurunan konsolidasi primer dan daya dukung pondasi dangkal pada tanah lunak. *G-SMART*, 6(2), 109-127. <https://doi.org/10.24167/gsmart.v6i2.4809>
- Kristiyanto, H., & Purwoko, F. (2022, 08). Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Tanah pada Pondasi Dangkal Berdasarkan Data SPT dan CPT. 4. DOI: <https://doi.org/10.47200/civetech.v4i2.1300>
- Lestari, R. T., & Herzanita, A. (2023, 11). Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal Terhadap Variasi Dimensi dan Kedalaman. *saintis*, 5. <http://jurnal.pnj.ac.id/index.php/cmj>
- Lestari, R. T., & Karim, M. H. (2023). Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal Terhadap Kedalaman (Studi Kasus: Kalimantan). *Construction and Material Journal*, 5(3), 175-182. <https://doi.org/10.32722/cmj.v5i3.5697>
- Mesri, G., & Godlewski, P. M. (2021). Time and Stress-Compressibility Interrelationship. *Journal of Geotechnical Engineering Division*.
- Murtadha, M. R., Minaka, U. S., & Devi, D. S. (2025). PENGARUH PENAMBAHAN FLY ASH PADA TANAH LEMPUNG LUNAK TERHADAP DAYA DUKUNG PONDASI DANGKAL: Studi Eksperimental dan Analisis Lapangan. *Journal Of Civil Engineering For Sustainable Future (JCESF)*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.36982/jcesf.v1i1.5547>
- Rohmahillah Aviskanasya Septiandri, R. R. A. S. R. A. S., & Nafi Arti, F. M. (2025, 10 31). Analisis Variasi Diameter Tiang Pancang Pada Perancangan Pondasi Rumah Susus. *saintis*. <https://doi.org/10.33506/rb.v1i102.4121>
- Sari, M. W., & Nugroho, S. A. (2021, 4). Analisis perbandingan daya dukung pondasi dangkal berdasarkan uji spt dengan metode terzaghi, meyerhoff, hensen, dan vesic. *saintis*, 21. [https://doi.org/10.25299/saintis.2021.vol21\(01\).6389](https://doi.org/10.25299/saintis.2021.vol21(01).6389)
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. Wiley.
- Waruwu, A. (2025). Analisis Daya Dukung Pondasi Dangkal Pada Tanah Stabilisasi. *Konferensi Nasional Teknik Sipil*, 3(5), 889-896.
- Wulandari, F. F. (2023). Perencanaan Koefisien Reduksi Bearing Capacity Pondasi Dangkal akibat Fluktuasi Muka Air Tanah. *Journal of Research and Inovation in Civil Engineering as Applied Science (RIGID)*, 2(2), 54-58. <https://doi.org/10.58466/rigid.v2i2.1170>
- Wulandari, F. F., Suwarno, E., & Santoso, E. (2023). Perencanaan Koefisien Reduksi Daya Dukung Tanah untuk Pondasi Dangkal pada Wilayah Fluktuasi Muka Air Tanah Tinggi. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(3), 880-887. <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i3.2594>