

PENENTUAN FAKTOR KEAMANAN PONDASI KELOMPOK TIANG PADA ABUTMENT JEMBATAN DI TANAH LEMPUNG KAKU

Muhammad Firdaus^{1*}, Ruspriansyah²

^{1,2}. Jurusan Teknik Sipil dan Kebumihan, Politeknik Negeri Banjarmasin, Indonesia
e-mail: *1muhammadfirdaus@poliban.ac.id (corresponding author)

Abstrak

Tanah lempung kaku yang berkembang di wilayah Rantau Kiwa, Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan, menimbulkan tantangan geoteknik tersendiri dalam perencanaan pondasi jembatan, khususnya terkait kapasitas daya dukung dan potensi penurunan jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik tanah lempung kaku, menganalisis kapasitas daya dukung tiang tunggal dan kelompok, mengevaluasi penurunan konsolidasi, serta menentukan faktor keamanan pondasi kelompok tiang pada abutment jembatan. Metode penelitian meliputi penyelidikan tanah melalui Standard Penetration Test (SPT) dan pengambilan undisturbed sample (UDS), pengujian laboratorium untuk memperoleh parameter sifat indeks dan mekanis tanah, koreksi nilai N-SPT, serta analisis kapasitas daya dukung pondasi tiang menggunakan pendekatan empiris Meyerhof. Analisis pondasi kelompok tiang dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi kelompok menggunakan metode Converse–Labarre, sedangkan penurunan dihitung berdasarkan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah pada lokasi penelitian tergolong lempung berplastisitas rendah dengan konsistensi kaku dan termasuk kategori normally consolidated clay (NC). Kapasitas daya dukung ultimit pondasi kelompok tiang konfigurasi 3 × 5 dengan diameter tiang 40 cm diperoleh sebesar ±201 ton, lebih besar dari beban rencana abutment sebesar 147 ton. Analisis penurunan konsolidasi menunjukkan bahwa penurunan total masih berada di bawah batas penurunan ijin. Faktor keamanan pondasi kelompok tiang terhadap keruntuhan blok diperoleh sebesar SF = 5,54, yang menunjukkan kondisi pondasi aman dan konservatif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam perencanaan dan evaluasi pondasi kelompok tiang pada tanah lempung kaku, khususnya untuk struktur jembatan di wilayah dengan kondisi geoteknik serupa.

Kata kunci— lempung kaku, pondasi kelompok tiang, Standard Penetration Test, daya dukung, penurunan konsolidasi, faktor keamanan

Abstract

Stiff clay deposits found in Rantau Kiwa Area, Tapin Regency, South Kalimantan, present specific geotechnical challenges in bridge foundation design, particularly related to bearing capacity and long-term settlement behavior. This study aims to identify the characteristics of stiff clay soil, analyze the bearing capacity of single piles and pile groups, evaluate consolidation settlement, and determine the safety factor of pile group foundations for bridge abutments. The research methodology includes geotechnical investigation using the Standard Penetration Test (SPT) and undisturbed soil sampling (UDS), laboratory testing to determine index and mechanical soil properties, correction of N-SPT values, and bearing capacity analysis of pile foundations using the Meyerhof empirical approach. The pile group analysis considers group efficiency based on the Converse–Labarre method, while settlement analysis is performed using Terzaghi's one-dimensional consolidation theory. The results indicate that the soil at the study site is classified as low-plasticity stiff clay and belongs to the normally consolidated clay (NC) category. The ultimate bearing capacity of the 3 × 5 pile group foundation with a pile diameter of 40 cm is approximately 201 tons, which

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025

exceeds the design load of the bridge abutment of 147 tons. The consolidation settlement analysis shows that the total settlement remains below the allowable limit. The safety factor against pile group block failure is calculated to be $SF = 5.54$, indicating that the foundation system is safe and conservative. The findings of this study are expected to contribute to the practical design and evaluation of pile group foundations in stiff clay soils, particularly for bridge structures constructed under similar geotechnical conditions.

Keywords— *stiff clay, pile group foundation, Standard Penetration Test, bearing capacity, consolidation settlement, safety factor.*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur jembatan di wilayah dengan kondisi tanah kohesif menuntut perencanaan pondasi yang andal, khususnya pada daerah yang didominasi oleh tanah lempung. Tanah lempung dengan konsistensi kaku umumnya memiliki kuat geser yang relatif tinggi, namun masih berpotensi mengalami deformasi jangka panjang akibat konsolidasi dan pembebanan berulang. Kondisi ini menjadikan analisis kapasitas daya dukung dan penurunan pondasi sebagai aspek krusial dalam menjamin kinerja dan keselamatan struktur jembatan (Bowles, 2020; Das & Sobhan, 2021).

Pondasi tiang pancang banyak digunakan pada pembangunan jembatan untuk menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah yang lebih kompeten. Kapasitas daya dukung tiang dipengaruhi oleh kontribusi tahanan ujung dan gesekan selimut, yang sangat bergantung pada karakteristik tanah di sepanjang kedalaman tiang. Oleh karena itu, penyelidikan tanah yang akurat menjadi dasar utama dalam perencanaan pondasi tiang (Peck et al., 1974; Tomlinson & Woodward, 2015).

Salah satu metode penyelidikan tanah yang paling umum digunakan dalam praktik geoteknik adalah Standard Penetration Test (SPT). Nilai pukulan SPT (N-SPT) sering dimanfaatkan sebagai indikator kekakuan tanah serta dasar korelasi empiris untuk menentukan parameter tanah dalam analisis pondasi. Namun, interpretasi nilai N-SPT memerlukan kehati-hatian karena dipengaruhi oleh kondisi pengujian dan tekanan overburden, sehingga perlu dilakukan koreksi dan interpretasi yang tepat sesuai rekomendasi literatur geoteknik (Skempton, 1986; Mayne, 2021).

Selain pengujian lapangan, pengambilan undisturbed sample (UDS) dan pengujian laboratorium diperlukan untuk memperoleh parameter sifat indeks dan mekanis tanah, termasuk parameter konsolidasi. Parameter ini sangat penting dalam evaluasi penurunan pondasi, terutama pada tanah lempung yang tergolong normally consolidated clay (NC), di mana penurunan konsolidasi

primer menjadi komponen dominan dalam deformasi jangka panjang (Terzaghi et al., 1996; Coduto et al., 2016).

Dalam perencanaan pondasi tiang, berbagai pendekatan empiris telah dikembangkan untuk memperkirakan kapasitas daya dukung berdasarkan data SPT. Metode Meyerhof merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan karena kesederhanaannya dan kesesuaiannya untuk analisis pondasi berbasis data lapangan terbatas (Meyerhof, 1976; Randolph, 2020). Untuk pondasi kelompok tiang, interaksi antartiang dapat menyebabkan penurunan efisiensi kapasitas kelompok dibandingkan dengan kapasitas tiang tunggal. Oleh karena itu, analisis efisiensi kelompok tiang perlu dilakukan menggunakan metode yang telah teruji, seperti metode Converse-Labarre (Converse & Labarre, 1941; Whitman & Liao, 1985).

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas perencanaan pondasi tiang pada tanah lempung, namun sebagian besar studi masih berfokus pada kapasitas tiang tunggal atau tidak secara eksplisit mengevaluasi pengaruh efisiensi kelompok dan penurunan konsolidasi pada tanah lempung kaku dengan data lapangan terbatas. Selain itu, kajian yang menggabungkan analisis kapasitas daya dukung, penurunan, dan faktor keamanan pondasi kelompok tiang berbasis data SPT dan UDS pada kondisi tanah lempung kaku masih relatif terbatas, khususnya untuk aplikasi pada struktur jembatan di wilayah Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi karakteristik tanah lempung kaku berdasarkan data SPT dan UDS, menganalisis kapasitas daya dukung tiang tunggal dan kelompok, mengevaluasi penurunan konsolidasi pondasi kelompok tiang, serta menentukan faktor keamanan pondasi pada abutment jembatan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam perencanaan pondasi jembatan pada tanah lempung kaku dengan kondisi geoteknik serupa.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025

II. METODE PENELITIAN

a. Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Desa Rantau Kiwa, Kabupaten Tapin, Kalimantan Selatan. Data yang digunakan terdiri atas data lapangan dan data laboratorium yang diperoleh melalui kegiatan investigasi geoteknik.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

b. Tahapan Analisis Penelitian

Metode penelitian disusun dalam beberapa tahapan analisis yang saling berkaitan sebagai berikut.

- Pengambilan Sampel dan Pengujian Lapangan

Investigasi tanah dilakukan melalui pengeboran tanah disertai pengambilan Undisturbed Sample (UDS) serta pelaksanaan Standard Penetration Test (SPT) pada interval kedalaman tertentu untuk memperoleh nilai pukulan tanah (N-SPT).

- Koreksi Nilai N-SPT

Nilai N-SPT hasil pengujian lapangan dikoreksi terhadap pengaruh energi, diameter lubang bor, panjang batang bor, dan kondisi pengujian lainnya untuk memperoleh nilai N-SPT terkoreksi yang merepresentasikan kondisi tanah sebenarnya.

- Penentuan Parameter Teknis Tanah

Parameter teknis tanah ditentukan dengan mengombinasikan hasil pengujian laboratorium dari UDS dan data lapangan SPT. Pengolahan data mengacu pada SNI 8460:2017 serta korelasi empiris internasional, seperti Meyerhof, Peck, dan Liao & Whitman, untuk menentukan parameter kuat geser, berat isi tanah, serta sifat kompresibilitas tanah lempung.

- Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal

Kapasitas daya dukung tiang tunggal dihitung berdasarkan kontribusi tahanan ujung (end bearing) dan gesekan selimut (skin friction) menggunakan parameter tanah hasil tahap sebelumnya.

- Analisis Pondasi Kelompok Tiang

Kapasitas pondasi kelompok tiang dianalisis dengan mempertimbangkan pengaruh interaksi antartiang serta efisiensi kelompok tiang terhadap kapasitas total pondasi.

- Evaluasi Penurunan (Settlement)

Penurunan pondasi dianalisis menggunakan pendekatan konsolidasi satu dimensi (1D consolidation) pada tanah lempung, serta mempertimbangkan pengaruh kelompok tiang. Nilai penurunan hasil perhitungan dibandingkan dengan penurunan ijin sebagai kriteria evaluasi keamanan dan kinerja pondasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

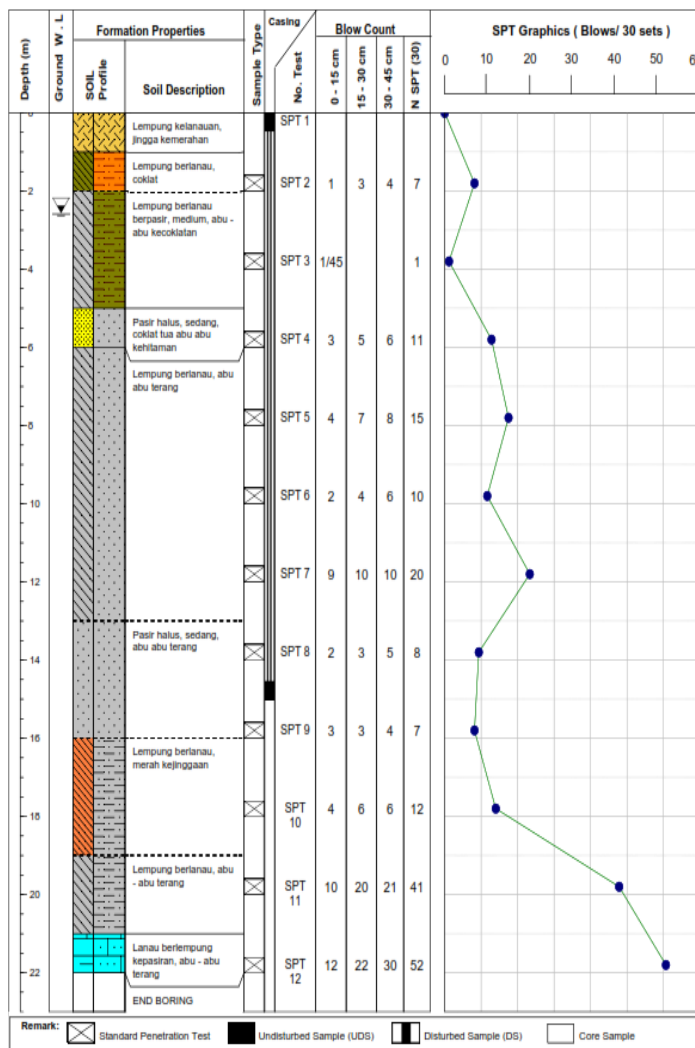
Penyelidikan Hasil penyelidikan tanah melalui pengujian Standard Penetration Test (SPT) menunjukkan adanya peningkatan nilai N-SPT seiring dengan bertambahnya kedalaman hingga 12 m, yang mencerminkan peningkatan tingkat kekakuan tanah terhadap kedalaman. Nilai N-SPT yang berada pada rentang 15–30 mengindikasikan bahwa lapisan tanah dominan di lokasi penelitian tergolong lempung berkonsistensi kaku (stiff clay). Secara geoteknik, nilai N-SPT pada rentang tersebut berkorelasi dengan peningkatan kuat geser tak terdrainasi (c_u) dan modulus kekakuan tanah, sehingga tanah memiliki kemampuan yang memadai dalam mendukung pondasi tiang. Namun demikian, meskipun tergolong lempung kaku, tanah kohesif tetap berpotensi mengalami deformasi jangka panjang akibat proses konsolidasi, sehingga analisis penurunan tetap diperlukan dalam perencanaan pondasi.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

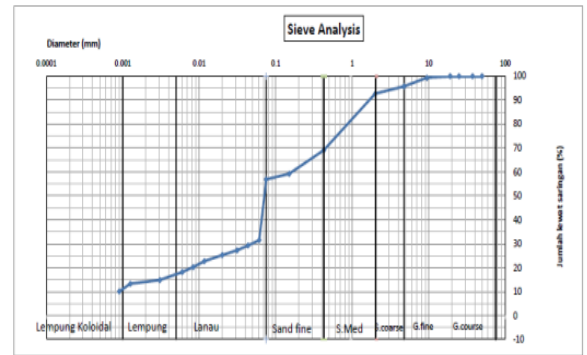
Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025



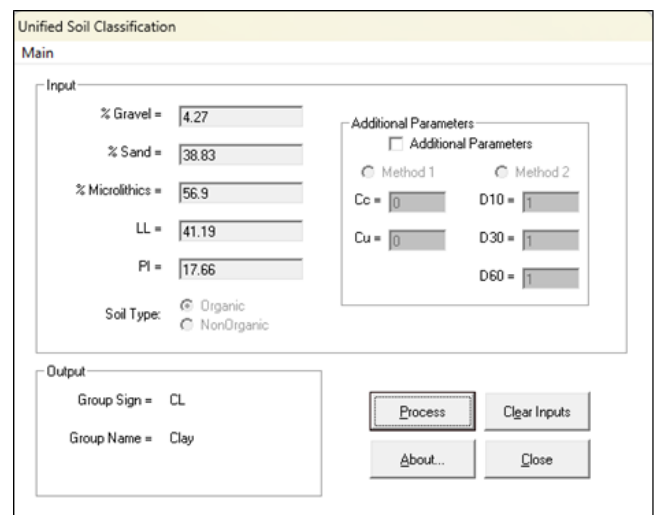
Gambar 2. Grafik hasil pengujian Standard Penetration (SPT) di lapangan

Interpretasi kondisi tanah berdasarkan data SPT tersebut diperkuat oleh hasil pengujian laboratorium terhadap sampel Undisturbed Sample (UDS). Hasil pengujian gradasi dan hidrometer menunjukkan dominasi fraksi halus, sedangkan hasil identifikasi menggunakan sistem klasifikasi USCS mengklasifikasikan tanah sebagai lempung (Clay) dengan plastisitas rendah. Karakteristik ini konsisten dengan tanah lempung kaku yang umumnya memiliki plastisitas rendah hingga sedang serta menunjukkan perilaku mekanik yang relatif stabil terhadap pembebanan.



Kerikil (%)	Pasir (%)			Lanau (%)	Lempung (%)	Lempung Kolloidal (%)
	Kasar (%)	Sedang (%)	Halus (%)			
4.27	3.03	23.62	12.17	43.03	13.87	0
4.27	38.83					56.90

Gambar 3. Hasil keluaran pengujian gradasi & hidrometer sesuai SNI



Gambar 4. Hasil keluaran pengujian properties tanah untuk menghasilkan jenis tanah menggunakan sistem klasifikasi USCS di kedalaman 12 meter

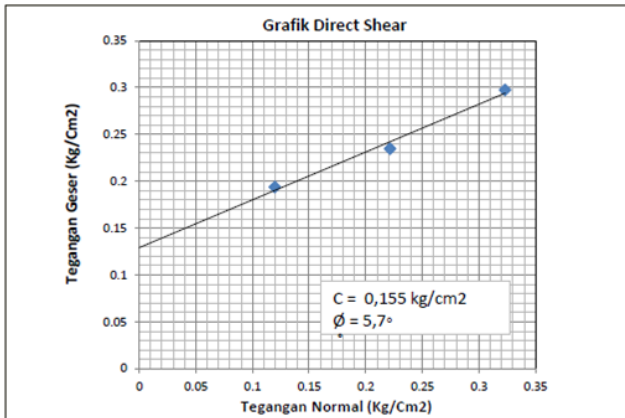
Hasil pengujian geser langsung (direct shear test) menunjukkan adanya peningkatan kuat geser tanah seiring dengan bertambahnya tegangan normal. Tren ini sejalan dengan peningkatan nilai N-SPT terhadap kedalaman, yang menunjukkan bahwa peningkatan tingkat kekakuan tanah berbanding lurus dengan peningkatan resistansi geser lapisan tanah. Hubungan ini memperkuat interpretasi bahwa lapisan tanah di lokasi penelitian layak digunakan sebagai lapisan pendukung pondasi tiang.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

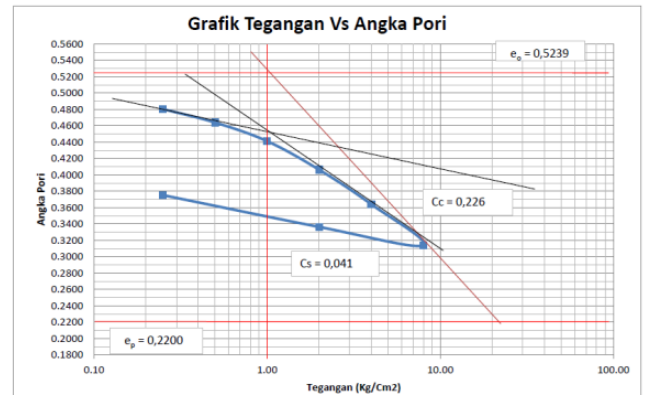
Published : 31 Desember 2025



Gambar 5. Hasil keluaran pengujian Mekanis Geser langsung sesuai SNI

Hasil pengujian konsolidasi satu dimensi menunjukkan bahwa tanah pada kedalaman pengamatan tergolong normally consolidated clay (NC), yang ditunjukkan oleh nilai Over-Consolidation Ratio (OCR) ≈ 1. Pola kurva hubungan angka pori dan tegangan

efektif memperlihatkan karakteristik khas tanah NC, di mana deformasi jangka panjang didominasi oleh konsolidasi primer.



Gambar 6. Grafik pengujian konsolidasi 1 dimensi sesuai SNI

TABEL 1. Data keluaran pengujian konsolidasi 1 dimensi sesuai SNI

Pressure (tegangan) (kg/cm ²) (1)	H (cm) (2)	Perubahan tinggi contoh tanah ΔH (cm) (3)	ΔH/ H (4) = (3) / (2)	mv (cm ² /kg) (5) = (4) : (1)	Cv (cm ² /det) (6)	k = mv · Cv · γ _w (cm/det) (7) = (5) x (6) x 10 ⁻³
0.00	1.4000					
0.25	1.3601	0.0399	0.0293	0.1173	0.0001869	2.19348E-08
0.50	1.3450	0.0151	0.0112	0.0225	0.0001796	4.03156E-09
1.00	1.3241	0.0209	0.0158	0.0158	0.0003933	6.20812E-09
2.00	1.2920	0.0321	0.0248	0.0124	0.0003778	4.69381E-09
4.00	1.2532	0.0388	0.0310	0.0077	0.0006358	4.92127E-09
8.00	1.2070	0.0462	0.0383	0.0048	0.0005940	2.84229E-09
		Rata-rata		0.0301	0.0003946	7.43864E-09

Parameter konsolidasi tanah yang diperoleh dari hasil uji laboratorium dan nilai interpretasi yang digunakan dalam analisis penurunan pondasi kelompok tiang dirangkum secara sistematis untuk memperjelas dasar perhitungan yang digunakan. Parameter tersebut meliputi indeks kompresi (Cc), angka pori awal (e₀),

koefisien kompresibilitas (mv), dan koefisien konsolidasi (Cv), serta status konsolidasi tanah berdasarkan nilai OCR.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025

TABEL 2. Ringkasan Parameter Konsolidasi Tanah

No	Parameter	Simbol	Satuan	Hasil Uji Lab	Nilai Desain
1	Kedalaman sampel	–	m	12,0	12,0
2	Jenis tanah (USCS)	–	–	CL	CL
3	Angka pori awal	e_0	–	0,74	0,72
4	Indeks kompresi	C_c	–	0,25	0,23
5	Indeks rekonsolidasi	C_r	–	0,05	0,04
6	Koef. kompresibilitas	m_v	m^2/kN	$3,4 \times 10^{-4}$	$3,1 \times 10^{-4}$
7	Koef. konsolidasi	C_v	$m^2/tahun$	0,78	0,82
8	Tegangan prakonsolidasi	σ'_p	kPa	$\approx \sigma'_o$	$\approx \sigma'_o$
9	OCR	OCR	–	$\approx 1,0$	$\approx 1,0$

Sebagai penghubung antara data lapangan dan parameter desain, digunakan korelasi standar nilai NSPT terhadap konsistensi tanah untuk menginterpretasikan tingkat kekakuan lempung dan menentukan zona lapisan pendukung pondasi. Korelasi parameter tanah berdasarkan nilai NSPT tersebut disajikan dalam bentuk tabel acuan.

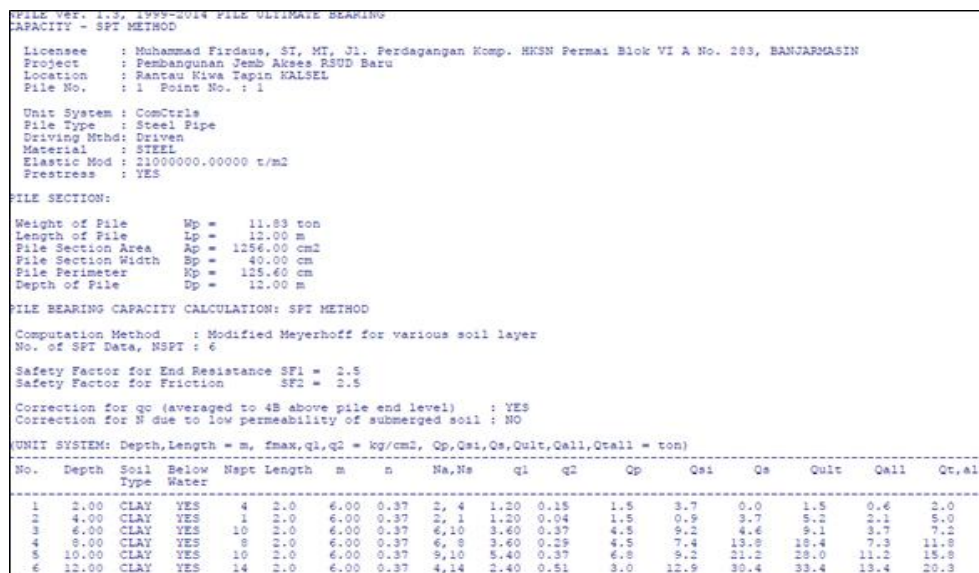
TABEL 3. Korelasi Nilai Parameter Standar dari NSPT

PASIR		TANAH LEMPUNG ATAU LANAU	
Nilai N	Kepadatan Relatif	Nilai N	Konsistensi
0 - 4	Sangat Lepas	0 - 2	Sangat Lunak
4 - 10	Lepas	2 - 4	Lunak
10 - 30	Medium	4 - 8	Sedang
30 - 50	Padat	8 - 15	Kaku
> 50	Sangat Padat	15 - 30	Sangat Kaku
		> 30	Keras

Perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal dilakukan menggunakan pendekatan empiris Meyerhoff yang berbasis nilai N-SPT. Kapasitas ultimit aksial tiang dinyatakan sebagai penjumlahan antara tahanan ujung dan tahanan gesek selimut, yang dirumuskan sebagai:

$$Q_u = Q_b + Q_s \tag{1}$$

Pendekatan Meyerhoff dipilih karena umum digunakan dalam perencanaan pondasi tiang berbasis data lapangan dan terbukti memberikan hasil yang konservatif serta andal pada kondisi investigasi terbatas.



Gambar 7. Perhitungan kapasitas daya dukung pondasi tiang metode NSPT

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025

Hasil perhitungan menunjukkan nilai $SF = 5,54$, yang mengindikasikan bahwa sistem pondasi kelompok tiang berada dalam kondisi aman dan konservatif, serta memenuhi persyaratan desain pondasi jembatan dari aspek stabilitas dan keamanan struktur.

IV KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi tanah pada lokasi penelitian di Desa Rantau Kiwa, Kabupaten Tapin, didominasi oleh tanah lempung berplastisitas rendah dengan konsistensi kaku (stiff clay). Hal ini ditunjukkan oleh nilai N-SPT yang berada pada kisaran 15–30 serta hasil uji konsolidasi yang mengindikasikan tanah tergolong normally consolidated clay (NC). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa meskipun tanah memiliki kuat geser yang relatif tinggi, potensi penurunan konsolidasi primer tetap perlu diperhitungkan dalam perencanaan pondasi jembatan, khususnya untuk beban jangka panjang (Terzaghi et al., 1996; Coduto et al., 2016).

Analisis kapasitas daya dukung menunjukkan bahwa tiang pancang baja berdiameter 40 cm yang direncanakan memiliki kapasitas aksial tiang tunggal yang memadai berdasarkan pendekatan empiris Meyerhof berbasis data N-SPT. Pendekatan ini terbukti efektif dan masih relevan digunakan pada studi perencanaan pondasi dengan keterbatasan data lapangan, sebagaimana direkomendasikan dalam literatur geoteknik (Meyerhof, 1976; Randolph, 2020). Untuk pondasi kelompok tiang dengan konfigurasi 3×5 , hasil analisis yang mempertimbangkan efisiensi kelompok menggunakan metode Converse–Labarre menunjukkan kapasitas ultimit pondasi kelompok sebesar ± 201 ton, yang lebih besar dibandingkan beban rencana abutment jembatan sebesar 147 ton. Meskipun terjadi reduksi kapasitas akibat interaksi antartiang, kapasitas yang tersedia masih mencukupi untuk memenuhi persyaratan struktural (Converse & Labarre, 1941; Tomlinson & Woodward, 2015).

Evaluasi penurunan pondasi kelompok tiang berdasarkan teori konsolidasi satu dimensi menggunakan parameter C_c , e_0 , m_v , dan C_v dari hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa besarnya penurunan total masih berada di bawah batas penurunan ijin untuk struktur jembatan. Hasil ini konsisten dengan karakteristik tanah lempung kaku yang memiliki tingkat kompresibilitas relatif rendah dibandingkan tanah lempung lunak, sehingga deformasi jangka panjang

dapat dikendalikan dengan baik apabila desain pondasi dilakukan secara tepat (Bowles, 2020; Coduto et al., 2016).

Dari aspek stabilitas, perbandingan antara kapasitas ultimit pondasi kelompok tiang dan beban kerja menghasilkan nilai faktor keamanan sebesar $SF = 5,54$, yang menunjukkan bahwa sistem pondasi berada dalam kondisi aman dan bersifat konservatif terhadap potensi keruntuhan blok. Nilai faktor keamanan ini berada di atas batas minimum yang umumnya direkomendasikan dalam perencanaan pondasi jembatan pada tanah kohesif, sehingga dari sisi keselamatan struktural pondasi dapat dinilai memenuhi kriteria desain (Bowles, 2020; Randolph, 2020).

Secara praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan pondasi kelompok tiang pada tanah lempung kaku dengan penetrasi hingga lapisan tanah berkonsistensi kaku efektif dalam meningkatkan kapasitas daya dukung sekaligus mengendalikan penurunan. Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan karena hanya didasarkan pada data penyelidikan tanah dari satu titik bor (BH-1), sehingga variasi lateral sifat tanah belum sepenuhnya terwakili. Oleh karena itu, untuk tahap perencanaan yang lebih rinci, disarankan dilakukan penambahan titik bor, pengujian lapangan lanjutan, serta pemantauan penurunan jangka panjang pada masa operasional jembatan (Tomlinson & Woodward, 2015).

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi teknis dan akademis dalam evaluasi kapasitas daya dukung, penurunan, dan faktor keamanan pondasi kelompok tiang pada tanah lempung kaku berbasis data SPT dan UDS, serta dapat dijadikan acuan awal dalam perencanaan pondasi jembatan pada kondisi geoteknik yang serupa.

REFERENSI

- Bowles, J. E. (2020). *Foundation analysis and design* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Coduto, D. P., Yeung, M. R., & Kitch, W. A. (2016). *Geotechnical engineering: Principles and practices* (2nd ed.). Pearson Education.
- Converse, F. J., & Labarre, R. R. (1941). Design of pile foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 106, 746–779.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2021). *Principles of foundation engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Analisis dan perancangan fondasi* (Vol. 2). Gadjah Mada University Press.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025

- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 112(3), 373–377.
- Mayne, P. W. (2021). Interpretation of standard penetration test data for geotechnical design. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(6), 04021025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002485)
- Meyerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(3), 195–228.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *Foundation engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Randolph, M. F. (2020). Science and empiricism in pile foundation design. *Géotechnique*, 70(11), 903–924. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.217>
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3), 425–447.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2015). *Pile design and construction practice* (6th ed.). CRC Press.
- Whitman, R. V., & Liao, S. S. C. (1985). Pile group settlement in cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(7), 852–869.
- Winterkorn, H. F., & Fang, H. Y. (1975). *Foundation engineering handbook*. Van Nostrand Reinhold.
- Yin, J., & Liu, W. (2021). Load response of pile foundations under complex subsoil conditions. *Engineering Structures*, 240, 112344.
- Zhang, Y., & Liu, X. (2021). Advances in pile foundation technology. *Construction and Building Materials*, 283, 122–131.
- Zhao, W., Chen, H., & Fang, Y. (2023). Performance of steel piles in bridge foundations under variable loads. *Engineering Structures*, 274, 115143.

History of article:

Received : 20 Oktober 2024

Revised : 23 Desember 2025

Published : 31 Desember 2025