JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824

Analisis Daya Dukung dan Evaluasi Kinerja Fondasi Bored Pile Jembatan Sungai Lalan Jalan Tol Betung–Tempino

Bearing Capacity and Performance Evaluation of Bored Pile Foundation, Lalan River Bridge, Betung–Tempino Toll Road

Chatarina Sindy Octavia Sinaga[1]*, Indi Rezki Uli Simanjuntak[2], Syiril Erwin[3], Mizanuddin Sitompul[4]
Politeknik Negeri Medan
Email: ostinsinaga@gmail.com

Article Info

Article history :
Received : 05-11-2026
Revised : 07-11-2026
Accepted : 09-11-2026
Published : 11-11-2026

Abstract

This study analyzes the bearing capacity and evaluates the performance of the bored pile foundation at point P12R STA 106+400 of the Lalan River Bridge, Betung–Tempino–Jambi Toll Road, Section 2B. The pile is 1.5 m in diameter and 37 m deep and belongs to a 5 × 4 pile group. Secondary project data were used: Standard Penetration Test (SPT) records, a static axial loading test, and Crosshole Sonic Logging (CSL). Theoretical capacity was calculated with the Meyerhof method, the load–settlement curve was interpreted with the Davisson criterion, group efficiency was computed with the Converse–Labarre and Los Angeles formulas, and concrete integrity was assessed from the CSL results. The Meyerhof method gave an ultimate capacity (Qu) of 975.77 tons and an allowable capacity (Qa) of 390.31 tons. The Davisson interpretation gave a Qu of 390 tons and a Qall of 156 tons with a safety factor of 2.5, an elastic settlement of 3.51 mm, and an offset of 13.81 mm. Group efficiency was 0.625 (Converse–Labarre) and 0.796 (Los Angeles); the lower value was adopted as the more conservative one. The CSL test classified the pile as Good (G), although a soft toe about 0.5 m thick was indicated at the pile base. The Meyerhof estimate is about 2.5 times the capacity observed in the field, so the loading test should govern the allowable load. Overall, the foundation satisfies the bearing capacity, group efficiency, and integrity criteria.

Keywords: Bearing capacity, Bored pile, Crosshole sonic logging

Abstrak

Penelitian ini menganalisis daya dukung dan mengevaluasi kinerja fondasi bored pile pada titik P12R STA 106+400 Jembatan Sungai Lalan, Jalan Tol Betung–Tempino–Jambi Seksi 2B. Tiang berdiameter 1,5 m dengan kedalaman 37 m dan merupakan bagian dari kelompok 5 × 4 tiang. Data sekunder proyek yang dipakai ialah hasil Standard Penetration Test (SPT), uji pembebanan aksial statik, dan Crosshole Sonic Logging (CSL). Daya dukung teoritis dihitung dengan metode Meyerhof, kurva beban–penurunan diinterpretasikan dengan metode Davisson, efisiensi kelompok tiang dihitung dengan rumus Converse–Labarre dan Los Angeles, sedangkan integritas beton dinilai dari hasil CSL. Metode Meyerhof menghasilkan daya dukung ultimit (Qu) 975,77 ton dan daya dukung izin (Qa) 390,31 ton. Interpretasi Davisson memberikan Qu 390 ton dan Qall 156 ton dengan faktor keamanan 2,5, penurunan elastis 3,51 mm, dan offset 13,81 mm. Efisiensi kelompok tiang bernilai 0,625 (Converse–Labarre) dan 0,796 (Los Angeles); nilai terkecil dipakai karena lebih konservatif. Hasil CSL mengklasifikasikan tiang dalam kategori Good (G), meskipun terindikasi soft toe setebal sekitar 0,5 m di dasar tiang. Perkiraan Meyerhof sekitar 2,5

kali lebih besar daripada kapasitas hasil uji lapangan, sehingga hasil uji pembebanan sebaiknya menjadi acuan beban izin. Secara keseluruhan fondasi memenuhi kriteria daya dukung, efisiensi kelompok tiang, dan integritas beton.

Kata Kunci: Bored pile, Crosshole sonic logging, Daya dukung

PENDAHULUAN

Pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera ditujukan untuk memperkuat konektivitas antarwilayah dan mendorong pertumbuhan ekonomi di pulau ini. Salah satu ruasnya adalah Jalan Tol Betung–Tempino–Jambi Seksi 2B, yang antara lain memuat jembatan bentang panjang yang melintasi Sungai Lalan. Jembatan semacam ini menerima kombinasi beban yang lebih rumit daripada badan jalan biasa, sehingga ketepatan perencanaan fondasinya sangat menentukan keselamatan struktur secara keseluruhan.

Tanah di sekitar lokasi jembatan didominasi lempung yang berdaya dukung rendah dan mudah mampat. Kondisi itu membuat fondasi dangkal tidak layak dipakai, dan beban struktur atas perlu disalurkan ke lapisan yang lebih dalam dan lebih padat. Fondasi bored pile dipilih karena kapasitasnya besar, getarannya kecil saat dikerjakan, dan dapat menyesuaikan diri dengan berbagai kondisi tanah (Das, 2017). Namun, tiang bor dicor langsung di dalam lubang bor sehingga mutu akhirnya tidak dapat dilihat dari permukaan. Kondisi tanah yang sesungguhnya, kebersihan dasar lubang, dan kualitas pengecoran sama-sama ikut menentukan apakah tiang bekerja sesuai rencana.

Karena itu, kapasitas fondasi tiang biasanya dikaji lewat lebih dari satu cara. Data Standard Penetration Test (SPT) memberi perkiraan awal yang cepat dan murah, tetapi sifatnya empiris. Uji pembebanan aksial statik mengukur perilaku tiang secara langsung dan kurvanya dapat diinterpretasikan, salah satunya dengan metode Davisson. Adapun integritas beton diperiksa tanpa merusak tiang melalui Crosshole Sonic Logging (CSL). Ketiganya menjawab pertanyaan yang berbeda, sehingga hasilnya perlu dibaca bersama.

Sejumlah penelitian terdahulu telah menyentuh bagian-bagian dari persoalan ini. Ikhwan dkk. (2024) membandingkan daya dukung bored pile dari data SPT dengan hasil loading test dan memperoleh kapasitas ultimit analitis 3.693,916 kN, lebih besar daripada hasil loading test sebesar 2.598,76 kN. Syahputri dkk. (2025) menghitung daya dukung bored pile jembatan gantung dari data SPT dan mendapati metode Meyerhof (429,89 dan 618,06 ton) memberi nilai yang jauh lebih tinggi daripada metode Tomlinson (119,17 dan 237,49 ton). Al Faritzie dkk. (2025) menafsirkan uji pembebanan statik dengan metode Davisson, Mazurkiewicz, dan Chin, dengan hasil masing-masing 306,4; 284,12; dan 260,42 ton. Lumban Gaol dan Pasaribu (2025) menghitung fondasi spun pile dengan metode Meyerhof dan memperoleh 533,074 ton, sedangkan Yonamastuti dkk. (2022) memeriksa integritas beton bored pile dengan uji PIT dan CSL dan menemukan seluruh sampelnya berkategori baik.

Pada kajian yang ditelaah, metode-metode tersebut umumnya dipakai sendiri-sendiri. Perhitungan Meyerhof dari data SPT, interpretasi Davisson dari uji pembebanan, efisiensi kelompok tiang, dan hasil CSL jarang diletakkan pada satu titik fondasi yang sama. Penelitian ini

mencoba mengisi celah itu pada fondasi bored pile titik P12R STA 106+400 Jembatan Sungai Lalan. Tujuannya ialah menentukan daya dukung tiang dengan metode Davisson dan Meyerhof, menghitung efisiensi kelompok tiang 5 × 4 dengan metode Converse–Labarre dan Los Angeles, mengevaluasi integritas beton melalui CSL, serta menilai apakah fondasi memenuhi kriteria keamanan struktur.

Hasilnya diharapkan memberi gambaran yang lebih utuh tentang kesesuaian antara perhitungan teoritis dan kondisi aktual di lapangan, sekaligus menjadi bahan pembanding bagi perencana yang menghadapi kondisi tanah serupa, yaitu lempung lunak di bagian atas dan pasir padat di bagian bawah. Bagi pelaksana, pembacaan terpadu dari ketiga pengujian dapat membantu memastikan bahwa fondasi yang terpasang benar-benar memenuhi kriteria keamanan sebelum struktur atas dibebani.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini merupakan studi kasus kuantitatif terhadap satu titik fondasi pada pembangunan jembatan di ruas Jalan Tol Betung–Tempino–Jambi Seksi 2B, Provinsi Jambi. Pemilik proyek adalah PT Hutama Karya (Persero) dan pelaksana konstruksinya PT Hutama Karya Infrastruktur. Objek yang dikaji ialah bored pile pada titik P12R STA 106+400, yang termasuk dalam kelompok 20 tiang dengan susunan 5 × 4. Ringkasan data teknis fondasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Teknis Fondasi Bored Pile Titik P12R

No	Parameter	Nilai
1	Diameter bored pile	1,5 m
2	Kedalaman bored pile	37 m
3	Luas penampang ujung tiang (A_b)	1,767 m^2
4	Mutu beton	f'c 30
5	Mutu baja tulangan	BJTD 420
6	Jumlah dan susunan tiang	20 tiang (5 × 4)
7	Jarak antartiang (s)	3,75 m
8	Dimensi pile cap	18 m × 14,25 m × 2,5 m

Titik P12R dipilih karena fondasinya dibangun pada tanah yang didominasi lempung berdaya dukung rendah, sehingga kapasitas tiang perlu dikaji lebih dalam, dan karena jembatan memiliki tingkat risiko kegagalan yang lebih tinggi dibandingkan struktur lain pada ruas yang sama. Alasan praktisnya, data SPT, uji pembebanan aksial, dan CSL untuk titik ini tersedia lengkap sehingga ketiganya dapat dibandingkan pada tiang yang sama.

Data Penelitian

Pengujian lapangan tidak dilakukan sendiri oleh penulis. Seluruh data berasal dari dokumen proyek yang diperoleh selama kegiatan magang pada proyek tersebut, sehingga berstatus data sekunder. Data itu mencakup: (1) log bor dan nilai N-SPT yang memuat stratigrafi tanah, dipakai untuk menentukan parameter tanah; (2) gambar kerja (shop drawing) untuk dimensi tiang, yang

diperlukan dalam menghitung luas selimut dan luas ujung; (3) data uji pembebanan aksial statik berupa hubungan beban–penurunan; dan (4) hasil CSL untuk menilai kualitas dan homogenitas beton.

Prosedur Analisis

Analisis dilakukan dalam beberapa tahap. Nilai N-SPT lapangan lebih dahulu dikoreksi menjadi N_{60} dengan persamaan (1), dengan C_e efisiensi pemukul (45/60 = 0,75), C_b koreksi diameter lubang bor (1,00), C_s koreksi tabung sampler (1,00), dan C_r koreksi panjang batang bor (0,75 untuk kurang dari 3 m; 0,80 untuk 3–4 m; 0,85 untuk 4–6 m; 0,95 untuk 6–10 m; dan 1,00 untuk lebih dari 10 m).

$$N_{60} = N \cdot C_e \cdot C_b \cdot C_r \cdot C_s \quad (1)$$

Daya dukung teoritis dihitung dengan metode Meyerhof (1976) sebagai jumlah tahanan ujung dan tahanan selimut (Bowles, 1992; Das, 2017). Tahanan ujung diturunkan dari N_{60} pada dasar tiang, sedangkan tahanan selimut dihitung per lapisan setebal $L_i = 2$ m dengan keliling tiang $P = \pi D$. Pada lapisan kohesif dipakai faktor adhesi $\alpha = 0{,}55$ (Reese & Wright, 1977) dan kohesi tak terdrainase $c_u = 2/3\ N$, sedangkan pada lapisan non-kohesif dipakai persamaan (5). Daya dukung izin diperoleh dengan membagi daya dukung ultimit dengan faktor keamanan 2,5 sesuai SNI 8460:2017.

$$Q_u = Q_b + \Sigma Q_s \quad (2)$$

$$Q_b = 40 \cdot N_{60} \cdot A_b \quad (3)$$

$$Q_s = \alpha \cdot c_u \cdot L_i \cdot P \quad (4)$$

$$Q_s = 0{,}1 \cdot N \cdot L_i \cdot P \quad (5)$$

$$Q_a = Q_u / FS \quad (6)$$

Data uji pembebanan diinterpretasikan dengan metode Davisson (1973). Garis kompresi elastis tiang digeser sejauh offset Δ_0, dan titik potong garis itu dengan kurva beban–penurunan dibaca sebagai kapasitas ultimit. Penurunan elastis dan offset dihitung dengan persamaan (7) dan (8), dengan P beban, L panjang tiang, A luas penampang, E modulus elastisitas beton, dan D diameter tiang dalam inci.

$$\Delta_e = P \cdot L / (A \cdot E) \quad (7)$$

$$\Delta_0 = 0{,}15 + D / 120 \quad (8)$$

Efisiensi kelompok tiang dihitung dengan rumus Converse–Labarre (persamaan 9) dan Los Angeles (persamaan 10), dan kapasitas kelompok diperoleh dari persamaan (11). Pada rumus tersebut m dan n adalah jumlah tiang pada baris dan kolom, d diameter tiang, s jarak antartiang pusat ke pusat, dan $\theta = \arctan(d/s)$ dalam derajat.

$$E_g = 1 - \theta \cdot [(n-1)m + (m-1)n] / (90 \cdot m \cdot n) \quad (9)$$

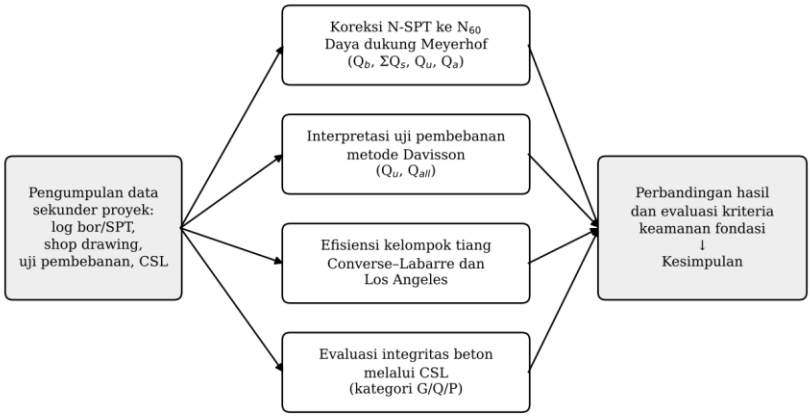
$$E_g = 1 - d / (\pi \cdot s \cdot m \cdot n) \cdot [m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2}\,(m-1)(n-1)] \quad (10)$$

JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824

$$Q_g = E_g \cdot n \cdot Q_a \quad (11)$$

Integritas beton dinilai dari hasil CSL yang mengacu pada standar ASTM D6760. Probe pemancar dan penerima diturunkan pada pipa akses yang dipasang sejajar di dalam tiang, lalu waktu tiba pertama gelombang (first arrival time, FAT) dan energi sinyal dibandingkan sepanjang kedalaman. Kondisi beton dikelompokkan menjadi Good (G) bila kenaikan FAT 0–10% dan pengurangan energi kurang dari 6 dB, Questionable (Q) bila kenaikan FAT 11–20% dan pengurangan energi kurang dari 9 dB, Poor/Flaw (P/F) bila kenaikan FAT 21–30% atau pengurangan energi 9–12 dB, serta Poor/Defect (P/D) bila kenaikan FAT melebihi 31% atau pengurangan energi melebihi 12 dB. Hasil seluruh analisis kemudian dibandingkan dan ditinjau terhadap kriteria keamanan fondasi.

Kelayakan fondasi dinilai terhadap empat kriteria: kapasitas daya dukung izin tidak lebih kecil daripada beban kerja yang diterima ($Q_a \geq P$); kapasitas ultimit hasil interpretasi Davisson lebih besar daripada beban kerja; efisiensi kelompok tiang yang makin mendekati 1 menandakan kinerja kelompok yang makin baik; dan hasil CSL berada pada kategori Good (G) tanpa indikasi cacat yang signifikan. Urutan seluruh tahapan penelitian diringkas pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lapisan Tanah dan Nilai N-SPT

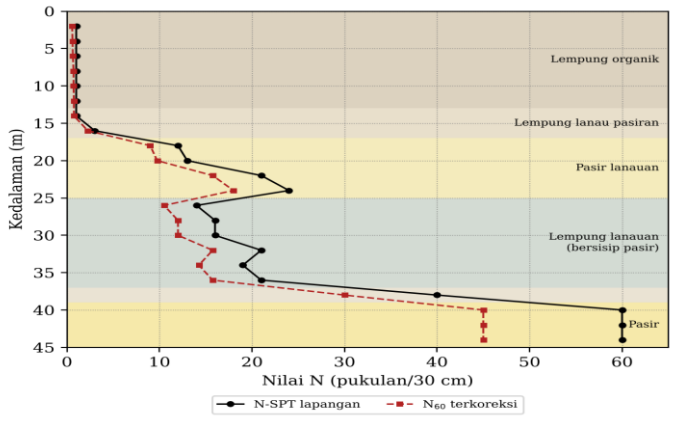
Hasil pengeboran di titik P12R memperlihatkan profil tanah berlapis dengan kekuatan yang sangat berbeda antarkedalaman (Tabel 2 dan Gambar 2). Dari permukaan hingga kedalaman 12 m dijumpai lempung organik dengan N-SPT hanya 1 pukulan, yang menandakan tanah sangat lunak. Pada kedalaman 14–16 m tanah berubah menjadi lempung lanau pasiran dengan N-SPT 1 lalu 3. Mulai kedalaman 18 m sampai 24 m terdapat pasir lanauan dengan N-SPT 12–24, disusul lempung lanauan dan lempung lanauan bersisip pasir hingga kedalaman 36 m (N-SPT 14–21). Lanau pasiran muncul pada kedalaman 38 m (N-SPT 40), dan pasir padat dengan N-SPT 60 dijumpai mulai kedalaman 40 m.

JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824

Tabel 2. Nilai N-SPT, N_{60}, dan Jenis Tanah pada Titik P12R

Kedalaman (m)	N-SPT	N_{60}	Jenis tanah
2	1	0,56	Lempung organik
4	1	0,60	Lempung organik
6	1	0,64	Lempung organik
8	1	0,71	Lempung organik
10	1	0,71	Lempung organik
12	1	0,75	Lempung organik
14	1	0,75	Lempung lanau pasiran
16	3	2,25	Lempung lanau pasiran
18	12	9,00	Pasir lanauan
20	13	9,75	Pasir lanauan
22	21	15,75	Pasir lanauan
24	24	18,00	Pasir lanauan
26	14	10,50	Lempung lanauan
28	16	12,00	Lempung lanauan bersisip pasir
30	16	12,00	Lempung lanauan bersisip pasir
32	21	15,75	Lempung lanauan bersisip pasir
34	19	14,25	Lempung lanauan bersisip pasir
36	21	15,75	Lempung lanauan bersisip pasir
38	40	30,00	Lanau pasiran
40	60	45,00	Pasir
42	60	45,00	Pasir
44	60	45,00	Pasir

Koreksi dari N lapangan ke N_{60} dilakukan dengan persamaan (1). Pada lapisan dangkal faktor panjang batang bor (C_r) masih di bawah 1,00, sehingga N_{60} jauh lebih kecil daripada N lapangan; pada kedalaman 2 m misalnya $N_{60} = 1 \times 0{,}75 \times 0{,}75 = 0{,}56$. Di bawah kedalaman 10 m C_r bernilai 1,00 dan N_{60} sama dengan 0,75 N. Nilai N = 60 pada pasir di kedalaman 40 m menjadi $N_{60} = 45$, dan angka inilah yang dipakai untuk menghitung tahanan ujung.



Gambar 2. Profil N-SPT dan N_{60} terhadap Kedalaman pada Titik P12R

Gambar 2 memperlihatkan bahwa sekitar 12 m bagian atas tiang berada pada tanah yang nyaris tidak memberi tahanan. Kapasitas tiang karenanya sangat bergantung pada lapisan di bawah kedalaman 18 m dan pada pasir padat di sekitar ujung tiang.

Daya Dukung Teoritis Metode Meyerhof

Luas penampang ujung tiang berdiameter 1,5 m adalah 1,767 m^2. Dengan N_{60} = 45 pada lapisan pasir di ujung tiang, tahanan ujung dihitung dengan persamaan (3): $Q_b = 40 \times 45 \times 1{,}767 = 3.180{,}6$ kN, atau 324,20 ton. Tahanan selimut dihitung per lapisan dengan keliling tiang $P = \pi \times 1{,}5 = 4{,}71$ m. Pada lapisan pasir lanauan di kedalaman 22 m (N = 21) diperoleh $Q_s = 0{,}1 \times 21 \times 2 \times 4{,}71 = 19{,}79$ ton, sedangkan pada lempung lanauan di kedalaman 26 m nilai $c_u = 2/3 \times 14 = 9{,}33$ sehingga $Q_s = 0{,}55 \times 9{,}33 \times 2 \times 4{,}71 \approx 48{,}4$ ton.

Penjumlahan tahanan selimut seluruh lapisan menghasilkan ΣQ_s = 651,57 ton, sehingga Q_u = 651,57 + 324,20 = 975,77 ton. Dengan faktor keamanan 2,5, daya dukung izin Q_a = 975,77/2,5 = 390,31 ton. Rekapitulasinya disajikan pada Tabel 3.

Faktor keamanan 2,5 yang dipakai berasal dari SNI 8460:2017 untuk fondasi dalam, dan diterapkan sama pada metode Meyerhof maupun Davisson. Dengan begitu perbandingan antara kapasitas izin kedua metode berlangsung pada dasar yang setara, dan selisih yang muncul sepenuhnya berasal dari kapasitas ultimit, bukan dari perbedaan faktor keamanan.

Tabel 3. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Tunggal Metode Meyerhof

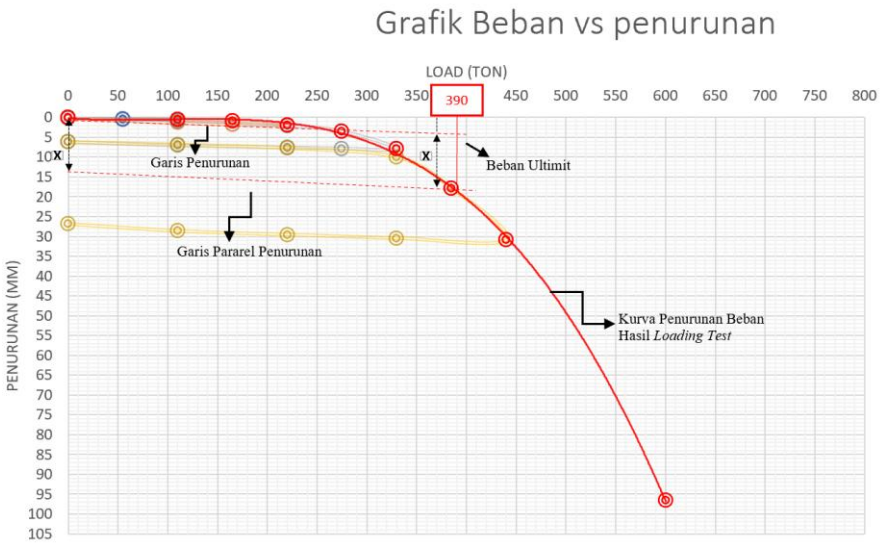
No	Komponen	Nilai	Satuan
1	Tahanan ujung (Q_b)	324,20	ton
2	Tahanan selimut (ΣQ_s)	651,57	ton
3	Daya dukung ultimit (Q_u)	975,77	ton
4	Faktor keamanan (FS)	2,5	–
5	Daya dukung izin (Q_a)	390,31	ton

Tahanan selimut menyumbang sekitar dua pertiga dari kapasitas ultimit (66,8%) dan tahanan ujung sisanya (33,2%). Lapisan lempung organik di 12 m teratas hanya memberi sekitar 19 ton atau kurang dari 3% dari total tahanan selimut, karena nilai N-SPT-nya hanya 1. Sumbangan terbesar datang dari lempung lanauan bersisip pasir pada kedalaman 28–36 m dan lanau pasiran pada kedalaman 38 m. Perlu dicatat bahwa tahanan ujung 324,20 ton mengandaikan dasar lubang bersih dan kontak penuh antara beton dan pasir padat; asumsi ini kembali relevan ketika hasil CSL dibahas.

Daya Dukung Berdasarkan Uji Pembebanan (Metode Davisson)

Pada beban uji 4.311,6 kN (sekitar 440 ton), panjang tiang 37 m, luas penampang 1,767 m^2, dan modulus elastisitas beton $25{,}74 \times 10^6$ kN/m^2, persamaan (7) menghasilkan penurunan elastis Δ_e = 3,51 mm. Offset Davisson dari persamaan (8) adalah Δ_0 = 13,81 mm. Garis yang ditarik sejajar dengan garis kompresi elastis dari titik offset memotong kurva beban–penurunan pada beban 390 ton (Gambar 3). Maka Q_u = 390 ton, dan dengan faktor keamanan 2,5 daya dukung izin Q_{all} = 390/2,5 = 156 ton (Tabel 4).

JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824



Gambar 3. Kurva Beban–Penurunan dan Interpretasi Daya Dukung Metode Davisson

Kurva hasil uji menunjukkan penurunan yang masih kecil pada beban rendah, lalu melengkung makin tajam setelah beban melewati sekitar 300 ton. Pada beban sekitar 440 ton penurunan mencapai kira-kira 31 mm, dan pada beban sekitar 600 ton sekitar 96 mm. Pada beban sampai sekitar 220 ton penurunan masih di bawah 3 mm, jauh di bawah nilai offset, sehingga pada beban izin 156 ton tiang bekerja dalam rentang yang hampir elastis.

Perlu diingat bahwa kapasitas Davisson bukan beban runtuh tiang, melainkan beban pada penurunan yang disepakati secara konvensi, yaitu penurunan elastis ditambah offset yang bergantung pada diameter. Karena itu nilainya relatif konservatif dan mudah direproduksi dari kurva yang sama. Kapasitas 390 ton setara sekitar 65% dari beban terbesar yang tergambar pada kurva uji (600 ton), dan pada beban tersebut kurva sudah jelas memasuki zona penurunan besar sehingga kapasitas yang dibaca tidak berada pada daerah ekstrapolasi.

Tabel 4. Parameter dan Hasil Interpretasi Metode Davisson

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Penurunan elastis (Δ_e)	3,51	mm
2	Offset Davisson (Δ_0)	13,81	mm
3	Daya dukung ultimit (Q_u)	390	ton
4	Faktor keamanan (FS)	2,5	–
5	Daya dukung izin (Q_{all})	156	ton

Efisiensi Kelompok Tiang

Kelompok tiang terdiri atas 20 tiang (m = 5, n = 4) berdiameter d = 1,5 m dengan jarak antartiang s = 3,75 m, atau 2,5 kali diameter. Sudut $\theta = \arctan(1{,}5/3{,}75) = 21{,}80°$. Metode Converse–Labarre menghasilkan $E_g = 1 - 21{,}80 \times [(4-1) \times 5 + (5-1) \times 4] / (90 \times 5 \times 4) = 0{,}625$, sedangkan metode Los Angeles menghasilkan $E_g = 0{,}796$ (Tabel 5). Nilai terkecil, 0,625, dipakai sebagai dasar evaluasi karena lebih konservatif. Efisiensi sebesar itu berarti sekitar 37,5% dari

jumlah kapasitas tiang tunggal hilang akibat interaksi antartiang, hal yang wajar mengingat jarak antartiang yang relatif rapat. Dengan Q_a tiang tunggal hasil Meyerhof 390,31 ton, kapasitas kelompok $Q_g = 0{,}625 \times 20 \times 390{,}31 = 4.878{,}9$ ton.

Kedua rumus memberi angka yang berbeda karena cara membangun efisiensinya tidak sama. Converse–Labarre menghitung efisiensi dari sudut θ yang ditentukan rasio diameter terhadap jarak, lalu mengaitkannya dengan jumlah baris dan kolom, sedangkan Los Angeles menjumlahkan pengaruh tiang-tiang yang bersebelahan, termasuk yang berada pada arah diagonal. Pemilihan nilai terkecil menempatkan evaluasi pada sisi aman, dan pilihan ini juga menghindari klaim bahwa kelompok tiang bekerja lebih efisien daripada yang dapat dipastikan dari data yang ada.

Tabel 5. Efisiensi dan Kapasitas Kelompok Tiang 5 × 4

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Sudut θ = arctan(d/s)	21,80	derajat
2	Efisiensi Converse–Labarre	0,625	–
3	Efisiensi Los Angeles	0,796	–
4	Efisiensi yang dipakai (terkecil)	0,625	–
5	Kapasitas kelompok (Q_g), berdasarkan Q_a Meyerhof	4.878,9	ton

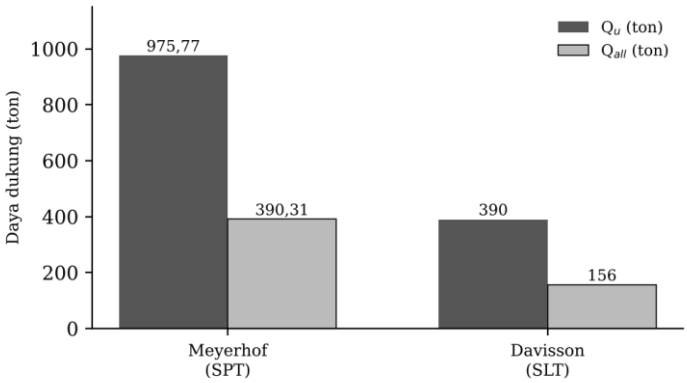
Perbandingan Hasil Analisis

Kedua pendekatan memberi hasil yang berbeda cukup jauh (Tabel 6 dan Gambar 4). Kapasitas ultimit Meyerhof (975,77 ton) sekitar 2,5 kali kapasitas ultimit hasil uji pembebanan (390 ton), dan rasio yang sama berlaku pada daya dukung izin (390,31 berbanding 156 ton). Arah selisih ini sejalan dengan temuan Ikhwan dkk. (2024), yang mendapati hasil analitis berbasis SPT lebih besar daripada loading test, walaupun selisih di sana jauh lebih kecil, sekitar 1,4 kali (3.693,916 kN dibanding 2.598,76 kN). Hasil Syahputri dkk. (2025) pun memperlihatkan betapa besar pengaruh pemilihan metode terhadap angka daya dukung.

Tabel 6. Perbandingan Daya Dukung Tiang Tunggal

Metode	Q_u (ton)	Q_a (ton)	Sumber data
Meyerhof (1976)	975,77	390,31	SPT
Davisson (1973)	390	156	Uji pembebanan
Rasio Meyerhof/Davisson	2,50	2,50	–

JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824



Gambar 4. Perbandingan Q_u dan Q_{all} Metode Meyerhof dan Davisson

Ada beberapa penyebab yang masuk akal. Pertama, metode Meyerhof bertumpu pada korelasi empiris N-SPT, sedangkan nilai N bersebaran dan peka terhadap energi pemukul serta cara pengujian. Kedua, kohesi tak terdrainase diperkirakan dari N dan faktor adhesi dianggap tetap 0,55, padahal lapisan di lokasi berselang-seling antara lempung dan pasir. Ketiga, rumus tahanan ujung mengandaikan dasar lubang bersih. Pada praktik bored pile, lumpur atau material lepas di dasar lubang dapat menurunkan tahanan ujung, dan CSL pada tiang ini memang menunjukkan indikasi soft toe setebal sekitar 0,5 m. Karena tahanan ujung menyumbang sepertiga kapasitas teoritis, gangguan di dasar tiang dapat menjelaskan sebagian selisih tersebut, meskipun dugaan ini tidak dapat dibuktikan dengan data yang tersedia.

Ada satu hal lain yang perlu dicatat. Daya dukung izin Meyerhof (390,31 ton) hampir sama dengan kapasitas ultimit hasil uji pembebanan (390 ton). Bila angka izin Meyerhof dipakai sebagai beban kerja, tiang praktis bekerja pada batas ultimit menurut Davisson dan margin keamanannya nyaris hilang. Untuk tiang ini, kapasitas izin sebaiknya mengacu pada hasil uji pembebanan (156 ton), dan perhitungan Meyerhof diperlakukan sebagai perkiraan awal yang cenderung terlalu besar. Pandangan ini selaras dengan Al Faritzie dkk. (2025) yang menekankan bahwa uji pembebanan diperlukan untuk memvalidasi perhitungan analitis. Konsekuensi yang sama berlaku bagi kelompok tiang: Q_g sebesar 4.878,9 ton dihitung dari Q_a Meyerhof, sedangkan dengan Q_{all} hasil uji pembebanan diperoleh $0{,}625 \times 20 \times 156 = 1.950$ ton.

Integritas Beton Berdasarkan CSL

Pengujian CSL dilakukan pada bored pile P12 R13 berdiameter 1.500 mm dengan enam lintasan antarpipa akses, yaitu Trace 1–2, 1–3, 1–4, 2–3, 2–4, dan 4–3. Panjang lintasan gelombang pada semua lintasan berkisar 41,44–41,54 m, yang menunjukkan bahwa sinyal ultrasonik merambat menerus sepanjang badan tiang hingga mendekati dasar. Interpretasi mengklasifikasikan tiang dalam kategori Good (G), yakni kenaikan FAT tidak lebih dari 10% dan pengurangan energi di bawah 6 dB, tanpa indikasi cacat struktural yang signifikan pada badan tiang. Meski begitu, pada seluruh lintasan terbaca indikasi soft toe di dasar tiang setebal sekitar 0,5 m (Tabel 7). Pengelompokan kategori mengikuti kriteria pada Tabel 8.

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian CSL Bored Pile P12 R13

Parameter	Hasil
Nama bored pile	P12 R13
Diameter bored pile	1.500 mm
Panjang lintasan pengujian	41,44–41,54 m
Jumlah lintasan	6 lintasan (Trace 1–2, 1–3, 1–4, 2–3, 2–4, 4–3)
Kategori hasil CSL	Good (G)
Indikasi di dasar tiang	Soft toe setebal ±0,5 m pada seluruh lintasan
Interpretasi	Beton homogen dan menerus pada badan tiang; memenuhi persyaratan kualitas, dengan catatan pada dasar tiang

Tabel 8. Kriteria Tingkat Kondisi Beton Berdasarkan Uji CSL

Kategori	Kriteria dan indikasi
Good (G)	Kenaikan FAT 0–10% dan pengurangan energi kurang dari 6 dB; kualitas beton baik
Questionable (Q)	Kenaikan FAT 11–20% dan pengurangan energi kurang dari 9 dB; kontaminasi ringan atau kualitas beton dipertanyakan
Poor/Flaw (P/F)	Kenaikan FAT 21–30% atau pengurangan energi 9–12 dB
Poor/Defect (P/D)	Kenaikan FAT lebih dari 31% atau pengurangan energi lebih dari 12 dB; indikasi lumpur, intrusi tanah, atau beton buruk
No Signal (NS)	Sinyal tidak diterima; kemungkinan akibat intrusi tanah atau cacat lain yang menyerap sinyal
Water (W)	Kecepatan sinyal 1.200–1.500 m/s; indikasi intrusi air atau kerikil berisi air

Soft toe setebal 0,5 m hanya sekitar 1,4% dari panjang tiang 37 m, sehingga pengaruhnya terhadap integritas badan tiang kecil. Namun bagian ini terkait langsung dengan tahanan ujung. CSL pada dasarnya tidak memberi informasi di bawah ujung pipa akses, sehingga pembacaan di dasar tiang perlu dikonfirmasi dengan cara lain, misalnya hasil uji pembebanan. Di sini hasil uji pembebanan sejalan dengan dugaan tersebut, sebab kapasitas terukur jauh di bawah perkiraan Meyerhof. Hasil CSL juga memberi keyakinan bahwa kapasitas yang diperoleh dari uji pembebanan tidak dipengaruhi cacat internal pada badan tiang.

Evaluasi Kriteria Keamanan Fondasi

Keamanan fondasi ditinjau dari empat aspek: kapasitas daya dukung, hasil uji pembebanan, efisiensi kelompok tiang, dan integritas beton berdasarkan CSL (Tabel 9). Pada seluruh aspek fondasi memenuhi kriteria yang ditinjau, dengan dua catatan: kapasitas izin tiang sebaiknya mengacu pada hasil uji pembebanan, dan indikasi soft toe di dasar tiang perlu diingat sebagai batas keyakinan terhadap tahanan ujung. Perbandingan dengan beban kerja rencana jembatan berada di luar cakupan penelitian ini.

JIIC: JURNAL INTELEK INSAN CENDIKIA
https://jicnusantara.com/index.php/jiic
Vol : 3 No: 11, November 2026
E-ISSN : 3047-7824

Tabel 9. Rekapitulasi Pemenuhan Kriteria Keamanan Fondasi

Aspek	Hasil	Penilaian
Uji pembebanan (Davisson)	Q_u 390 ton; Q_{all} 156 ton; Δ_e 3,51 mm	Memenuhi
Metode Meyerhof (SPT)	Q_u 975,77 ton; Q_a 390,31 ton	Memenuhi, cenderung terlalu besar
Efisiensi kelompok tiang	E_g 0,625 (Converse–Labarre); 0,796 (Los Angeles)	Memenuhi
Integritas beton (CSL)	Kategori Good (G); soft toe ±0,5 m di dasar tiang	Memenuhi, dengan catatan

Implikasi bagi Praktik Perencanaan

Temuan pada tiang ini memberi dua pelajaran praktis. Pertama, pada tanah lempung berlapis dengan lapisan atas yang sangat lunak, perhitungan empiris dari data SPT sebaiknya diperlakukan sebagai tahap awal dan bukan sebagai penentu akhir kapasitas izin. Uji pembebanan pada sebagian tiang uji tetap diperlukan untuk mengkalibrasi hasil perhitungan, sebagaimana lazim dilakukan pada fondasi jembatan. Kedua, pengendalian mutu di dasar lubang bor menentukan seberapa besar tahanan ujung dapat diandalkan. Tahanan ujung merupakan komponen yang paling sulit dipastikan setelah pengecoran, sedangkan CSL tidak menjangkau bagian di bawah ujung pipa akses, sehingga pencegahan di tahap pelaksanaan lebih murah daripada perbaikan sesudahnya.

Keterbatasan Penelitian

Hasil di atas perlu dibaca dengan beberapa batasan. Seluruh data berstatus sekunder dan berasal dari satu titik fondasi, sehingga temuan tidak otomatis berlaku bagi tiang lain di jembatan yang sama. Parameter tanah diperoleh dari korelasi N-SPT tanpa data laboratorium. Penurunan tidak dihitung secara teoritis, melainkan dibaca dari uji pembebanan, dan beban kerja rencana jembatan tidak dibandingkan secara langsung dengan kapasitas izin. Terakhir, hasil CSL hanya menggambarkan kondisi beton di antara pipa akses, bukan kondisi tanah di bawah dasar tiang.

KESIMPULAN

Bored pile berdiameter 1,5 m dan panjang 37 m pada titik P12R STA 106+400 memiliki kapasitas ultimit 390 ton menurut uji pembebanan yang diinterpretasikan dengan metode Davisson (daya dukung izin 156 ton dengan faktor keamanan 2,5), sedangkan perhitungan Meyerhof dari data SPT memberi 975,77 ton (daya dukung izin 390,31 ton). Selisih sekitar 2,5 kali itu menunjukkan bahwa perhitungan empiris dari SPT cenderung melebihkan kapasitas tiang ini, sehingga hasil uji pembebanan lebih tepat dijadikan acuan beban izin.

Efisiensi kelompok tiang 5 × 4 sebesar 0,625 menurut Converse–Labarre (0,796 menurut Los Angeles) dipakai sebagai dasar evaluasi karena lebih konservatif. CSL menempatkan tiang pada kategori Good (G), dengan indikasi soft toe sekitar 0,5 m di dasar tiang yang tidak mengurangi

penilaian integritas badan tiang. Berdasarkan seluruh hasil tersebut, fondasi memenuhi kriteria keamanan yang ditinjau, dengan catatan bahwa kapasitas izin mengikuti hasil uji pembebanan.

Penelitian lanjutan disarankan melengkapi data penyelidikan tanah dan pengujian lapangan, termasuk data laboratorium untuk menentukan parameter kuat geser tanah secara langsung agar perhitungan teoritis dapat dikalibrasi lebih baik. Perbandingan dengan beban kerja rencana dan penurunan teoritis juga layak dikaji karena berada di luar cakupan penelitian ini. Pada pekerjaan serupa, pembersihan dasar lubang bor dan pemeriksaan ujung tiang perlu mendapat perhatian khusus.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak proyek Jalan Tol Betung–Tempino–Jambi Seksi 2B atas kesempatan magang dan akses terhadap data proyek, serta kepada Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Medan atas dukungan selama penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Al Faritzie, H., Djohan, B., & Hastila, M. A. (2025). Analisis daya dukung tiang berdasarkan hasil pengujian pembebanan statik dan dinamik pada konstruksi gedung. *Jurnal Ilmiah Tekno Global*, 108–119.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*. Jakarta: BSN.

Bowles, J. E. (1992). *Analisa dan desain fondasi* (Edisi ke-4, Jilid 1). Jakarta: Erlangga.

Das, B. M. (2017). *Principles of foundation engineering* (9th ed.). United States of America: Cengage.

Davisson, M. T. (1973). High capacity piles. *Proceedings of the Lecture Series on Innovations in Foundation Construction*. Chicago: ASCE Illinois Section.

Ikhwan, B. K., Darmiyanti, L., & Pribadi, G. (2024). Perbandingan daya dukung dan penurunan bored pile berdasarkan data SPT dan loading test. *Jurnal Teknik Sipil*, 61–71.

Lumban Gaol, S. A., & Pasaribu, H. M. (2025). Analisis perhitungan daya dukung aksial dan biaya pelaksanaan fondasi spun pile. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 42–53.

Meyerhof, G. G. (1976). Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(3), 197–228.

Reese, L. C., & Wright, S. J. (1977). *Drilled shaft manual, Volume I: Construction procedures and design for axial loading*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Syahputri, S. N., dkk. (2025). Analisis daya dukung fondasi bored pile struktur jembatan gantung dengan menggunakan metode Meyerhof dan berdasarkan data Standard Penetration Test (SPT). *Journal of Social Science Research*, 9337–9349.

Yonamastuti, E., dkk. (2022). Evaluasi pemeriksaan integritas beton fondasi bored pile berdasarkan uji PIT (pile integrity test) dan uji CSL (crosshole sonic logging). *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 54–66.