

EVALUASI DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG PADA PROYEK JALAN TOL BINJAI – LANGSA STA 39+474.326

Mutia Kurnia Ningtiyas Rusli¹, Siti Safa Levina Putri², Muhammad Mabru³

Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan^{1,2,3}, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Medan
mutiakurnianingtiyasrusli@students.polmed.ac.id¹, sitisafalevinaputri@students.polmed.ac.id²,
muhammadmabru@polmed.ac.id³

ABSTRAK

Pondasi adalah bagian struktur bawah bangunan yang berhubungan langsung dengan tanah dan berfungsi untuk meyalurkan beban ke lapisan tanah yang kuat dan stabil. Pondasi jalan tol dirancang untuk menahan beban berat dari kendaraan yang melintas di atasnya, angin kencang, gempa bumi, dan faktor lingkungan lainnya, oleh karena itu pondasi tiang pancang (*pile foundation*) yang cocok digunakan dalam proyek jalan tol tersebut karena harus mampu memikul beban-beban yang berada di atasnya. Pondasi tiang pancang digunakan untuk menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas ketanah penunjang yang terletak pada kedalaman tertentu. Daya dukung pondasi dihitung atau dianalisa menggunakan data *Standard Penetration Test* (SPT) dengan metode *Mayerhoff*, data *Kalendering Test* dengan metode *Hilley* dan data *Pile Driving Analyzer* (PDA) *Test* dengan teknologi terkini. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan diperoleh daya dukung aman tiang tunggal berdasarkan *Standard Penetration Test* (SPT) pada kedalaman 34 m dengan diameter tiang 60 cm adalah 149,617 ton, berdasarkan data kalendering dengan metode *Hilley* pada kedalaman 34 m dengan diameter tiang 60 cm adalah 138,523 ton dan berdasarkan data uji *Pile Driving Analyzer* (PDA) diperoleh hasil daya dukung aman sebesar 160 ton. Desain formasi tiang kelompok aman terdiri dari 52 tiang dapat memikul beban sebesar 3485,153 ton.

Kata Kunci : Daya Dukung Pondasi, *Mayerhoff*, *Hilley*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Jalan tol adalah jenis jalan bebas hambatan yang dirancang untuk memfasilitasi lalu lintas berkecepatan tinggi dan terbatas antara kota atau daerah. Jalan tol biasanya memiliki banyak jalur yang dipisahkan oleh pusat reservasi atau penghalang dan memiliki rute masuk dan keluar yang terbatas. Untuk melintasi berbagai medan seperti sungai, jalan, jalan desa, dan juga rel kereta api umumnya dijalan tol menggunakan jembatan atau *underpass*. Dalam pembangunan jembatan atau *underpass* tersebut dibutuhkan sebuah pondasi, yang terletak pada *abutment* jembatan atau *underpass* tersebut. Oleh karena itu pondasi merupakan bagian bangunan yang menghubungkan bangunan dengan tanah, yang dapat menjamin kestabilan bangunan terhadap berat sendiri, beban berguna dan gaya-gaya luar terhadap gedung seperti tekanan angin dan gempa bumi (Heinz Frick, 2001).

Penggunaan pondasi tiang pancang sebagai pondasi bangunan apabila tanah yang berada dibawah dasar bangunan tidak mempunyai daya dukung (*bearing capacity*) yang cukup untuk memikul berat bangunan beban yang bekerja padanya (Sardjono, I., 1998). Dan apabila tanah yang mempunyai daya dukung yang cukup untuk memikul berat bangunan dan seluruh beban yang bekerja berada pada lapisan yang sangat dalam dari permukaan tanah kedalaman > 8 m. (Bowels J, 1991). Setiap tiang pancang mampu menahan beban struktural yang signifikan dan menyebarkannya ke tanah yang lebih stabil, sehingga menjaga kestabilan dan ketahanan jalan tol. Dengan latar belakang tersebut penulis tertarik untuk mengambil topik evaluasi pondasi tiang pancang untuk menjadi penelitian.

Batasan Masalah

1. Data yang digunakan berdasarkan *Standart Penetration Test* (SPT), data kalendering, dan data pengujian *Pile Driving Analizyer* (PDA) yang di peroleh dari hasil uji pondasi di lapangan.

2. Metode yang digunakan untuk menghitung daya dukung pondasi tiang pancang adalah metode *Mayerhoff* untuk data *Standard Penetration Test (SPT)* dan metode *Hilley* untuk data kalendering.

Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data *Standart Penetration Test (SPT)*;
2. Untuk mengetahui kemampuan pondasi tiang pancang berdasarkan data uji kalendering;
3. Untuk mengetahui kemampuan pondasi tiang pancang berdasarkan data uji *Pile Driving Analizer (PDA)*;
4. Untuk mengetahui kemampuan daya dukung pondasi tiang kelompok (*pile grup*).

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa buku dan jurnal sebagai bahan refrensi. Untuk mempelajari analisa dan design pondasi digunakan buku Bowels J. (1991), Hardiyatmo, H. C. (2010), M.J. Tomlinson. (1997), dan Sardjono, I. (1998). Untuk mempelajari mekanika tanah digunakan buku Bowels J.E. (1984), dan Hardiyatmo, H. C. (2019). Penelitian terdahulu diambil dari jurnal Sari, R. A. & Sarjono Puro, M.T. (2021) dengan judul *UJI PEMBEBANAN PADA PONDASI (load test pile)* adapun tujuan penelitiannya adalah untuk membuktikan bahwa tingkat keamanan suatustruktur atau bagian struktur sudah memenuhi persyaratan peraturan bangunan yang ada,yang tujuannya untuk menjamin keselamatan umum.

Daya dukung (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah di bawah dan sekitar pondasi untuk menahan beban yang bekerja dari struktur di atasnya. Daya dukung pondasi dalam dan besarnya penurunan pondasi dapat dihitung berdasarkan data tanah dari pengujian laboratorium atau pengujian di lapangan. Pengujian tanah di laboratorium dilakukan untuk memperoleh nilai sifat fisis (*index properties*) dan sifat mekanis (*engineering properties*) tanah. Pengujian di lapangan yang sering dilakukan untuk mengetahui besarnya daya dukung tanah adalah

Penelitian ini dilakukan berdasarkan beberapa pengujian di lapangan. Data pengujian lapangan yang digunakan adalah N-SPT dan pembebanan siklik (*cyclic loading test*) pada tiang bor. Data N-SPT akan dikorelasikan dengan sifat fisis dan mekanis tanah. Daya dukung pondasi dalam dapat dihitung dengan metode *Meyerhoff* dan data kalendering menggunakan metode *Hilley*.

Metode Mayerhof

Daya dukung aksial berdasarkan metode Meyerhof

- 1) Daya dukung ujung (end bearing)

$$Q_b = A_b \cdot f_b \quad (1)$$

$$Q_p = A_p \cdot q_p \quad (2)$$

dimana:

Q_p = daya dukung ujung (end bearing) (ton)

Q_b = Tahanan Ujung Tiang

A_b = Luas ujung bawah tiang (cm²)

f_b = Tahanan ujung satuan (kg/cm²)

q_p = unit end bearing (ton/m²)

A_p = luas penampang tiang pancang (m²)

- a) Tanah yang berbutir halus atau clay soil (c-soil)

Untuk jenis tanah berbutir halus (c-soil), secara umum q_p sebagai berikut:

$$f_b = N_c \cdot C_u \quad (3)$$

dimana:

N_c = 9

C_u = undrainded shear strength of clay on base of end bearing pile

- 2) Daya dukung selimut (skin friction)

Berdasarkan metode Based on N-SPT, perhitungan daya dukung selimut/gesek tiang pancang secara umum seperti berikut:

Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan Tahun 2023

$$Q_s = \Sigma f_s \cdot p \cdot \Delta L \quad (4)$$

Pada lapisan pasir :

$$Q_s = A_s \cdot f_s \quad (5)$$

dimana:

Q_s = daya dukung selimut tiang pancang (ton)

f_s = tahanan ujung tiang pancang (ton/m²)

p = keliling penampang tiang pancang (m)

ΔL = panjang unit tiang pancang (m)

A_s = Luas selimut

Tanah berbutir halus (clay soil)

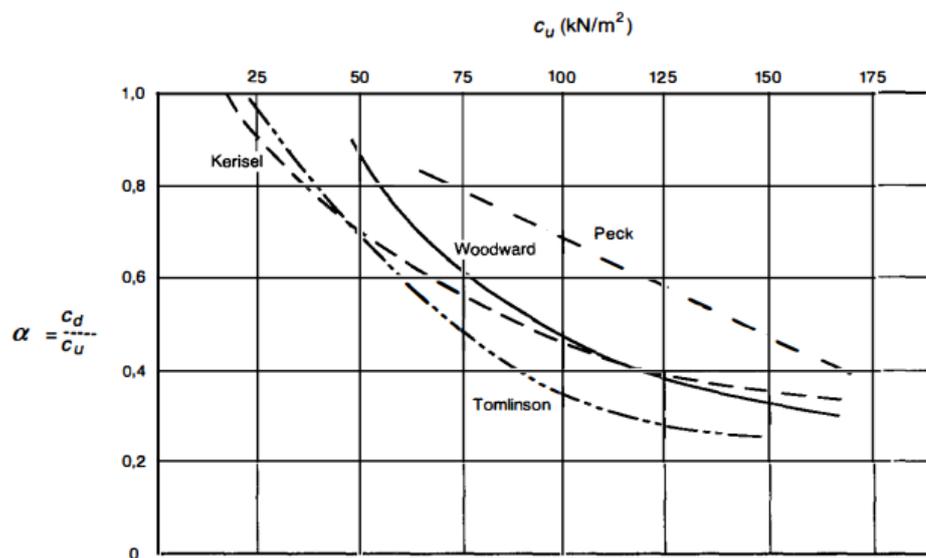
Untuk jenis tanah berbutir halus (clay soil) secara umum f_s dirumuskan sebagai berikut:

$$f_s = \alpha \cdot C_u \quad (6)$$

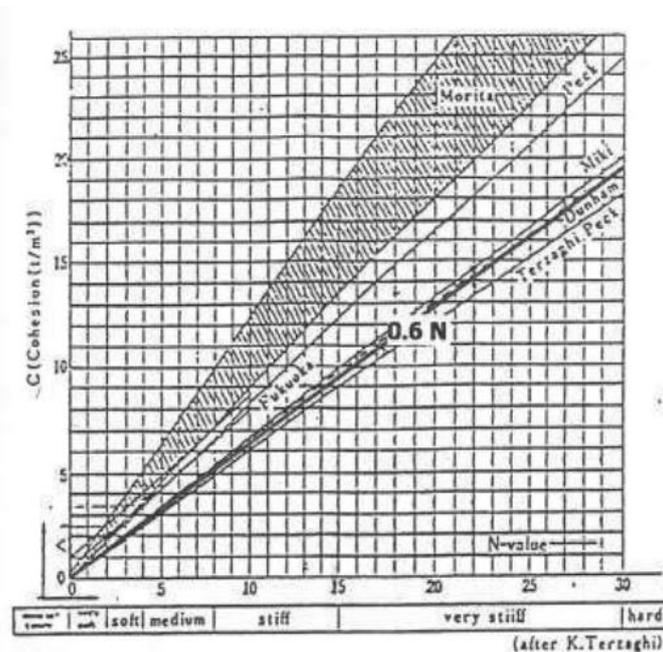
dimana:

α = faktor adhesi (adhesion factor)

C_u = undrained shear strength = $\frac{2}{3}$ N-SPT (ton/m²) (7)



Gambar 1. Faktor Adhesi (A) untuk Tiang Pancang dalam Lempung menurut Mcclelland, 1974
Sumber : (Hardiyatmo, 2010)



Gambar 2. Hubungan antara Nilai Kohesi dan Nilai N-SPT untuk Tanah Kohesif

3) Daya dukung ijin (Q_a)

Daya dukung ijin dirumuskan sebagai berikut:

dimana:

$$Q_a = \frac{Q_u}{F_k} \quad (8)$$

Q_u = daya dukung ultimate pondasi tiang pancang (ton)

N_p = harga N-SPT rata-rata pada dasar tiang (10D diatas tiang dan 4D dibawah dasar tiang)

N-SPT = nilai SPT di kedalaman yang ditinjau

A_p = luas dasar tiang (m^2)

A_s = luas selimut tiang (m^2)

Q_a = daya dukung ijin (ton)

F_k = faktor keamanan

$$W_p = Volume\ Tiang \times \gamma_{Beton} \quad (9)$$

Metode Hilley

$$Q_u = \frac{EWr \cdot h}{s + \frac{1}{2}K} \times \frac{Wr + n^2 \cdot Wp}{Wr + Wp} \quad (10)$$

dimana,

Q_u = kapasitas daya dukung ultimate(ton)

E = Efisiensi pemukul (*hammer efficiency*)

W = berat palu ram (ton)

P = berat tiang pancang (ton)

h = tinggi jatuh ram

S = penetrasi tiang pancang pada saat pembukaan terakhir (cm)

K = rata-rata rebound untuk 10 pukulan terakhir (cm)

Daya Dukung Kelompok Tiang

Kapasitas dukung ultimate kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dinyatakan oleh persamaan:

$$Q_g = E_g n Q_u \quad (11)$$

Dimana :

Q_g = Daya dukung kelompok tiang

E_g = Efisiensi kelompok tiang

n = Jumlah tiang

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s - W_p \quad (12)$$

METODE PENELITIAN

Teknik Pengumpulan Data

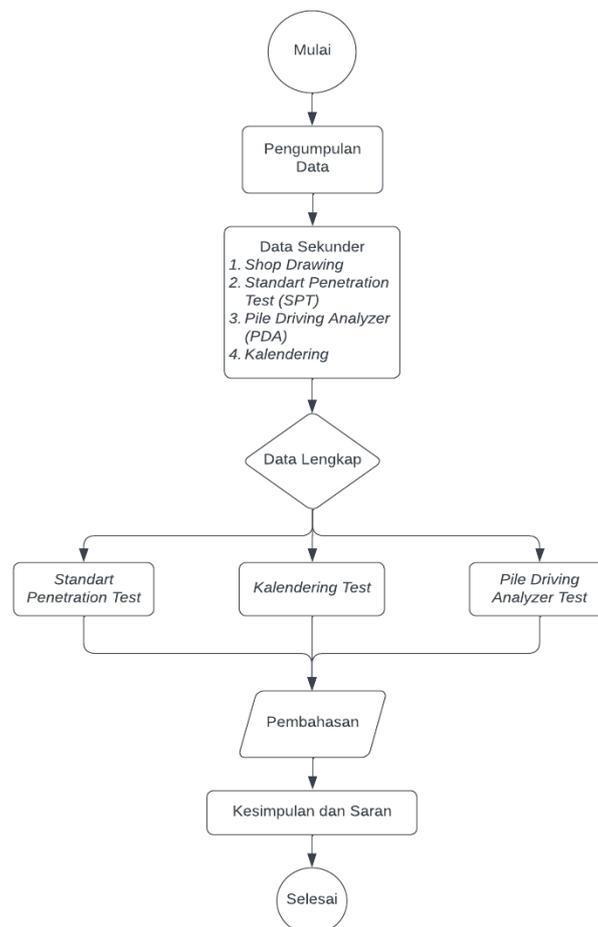
Data yang dikumpulkan data sekunder.

Data sekunder

Pada penelitian ini data sekunder yang diperoleh dari perusahaan terkait yaitu PT HUTAMA KARYA (PERSERO), antara lain:

- Data lapangan Data lapangan yaitu berupa data Standard Penetration Test (SPT), data kalendering, dan data Pile Driving Analyzer (PDA).
- Shopdrawing yaitu denah dan detail pondasi tiang pancang yang digunakan di lapangan.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam menyusun penelitian ini adalah melakukan pengumpulan data dari lapangan, kemudian mengumpulkan literatur dan menganalisis data serta mengambil kesimpulan dan saran dari data yang telah dianalisis yang dapat dilihat dalam gambar di bawah ini:



Gambar 3. Alur Penelitian

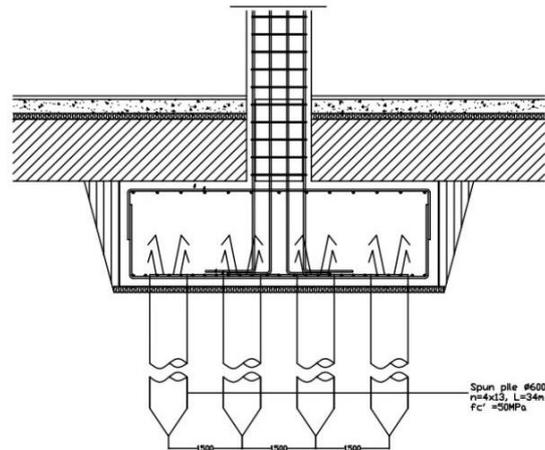
Lokasi Penelitian

Adapun Lokasi Penelitian di Jalan Tol Binjai Langsa STA 39+474.326 pada Desa Besilam Jl. Tj. Selamat, Kec. Padang Tualang, Kabupaten Langkat Sumatera Utara

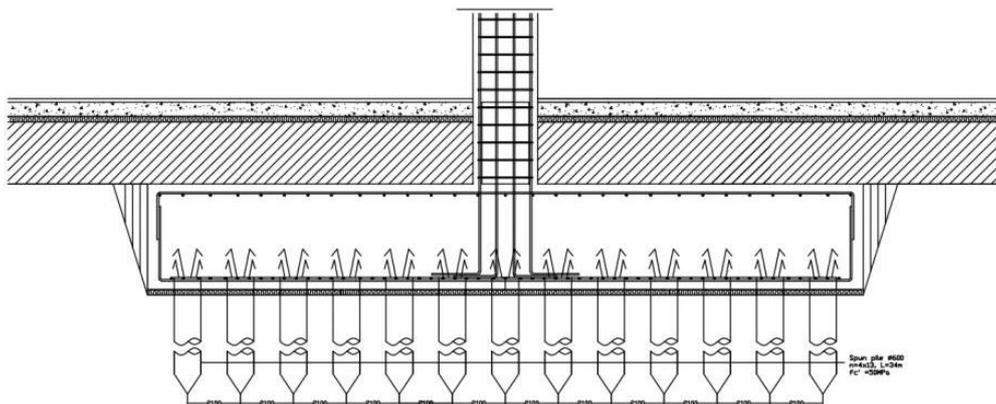
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Lapangan Data yang diperoleh dari pengujian di lapangan yaitu data *Standard Penetration Test (SPT)*, data Kalendering dan data *Pile Driving Analyzer (PDA)*.

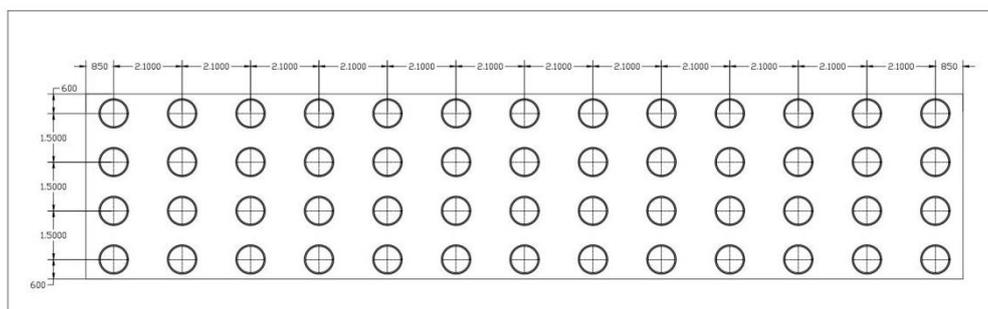
Detail Pondasi Tiang Pancang dapat dilihat pada gambar 3 dan gambar 4 dengan tampak atas dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 4. Pondasi Tiang Potongan 1-1
Sumber : Mutia, 2023



Gambar 5. Pondasi Tiang Pancang Potongan 2-2
Sumber : Mutia, 2023



Gambar 6. Pondasi Tiang Pancang Tampak Atas
Sumber : Siti Safa, 2023

Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Data *Standard Penetration Test* (SPT)

Dalam menganalisis daya dukung tiang pancang berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT) dilakukan dengan Metode *Meyerhoff*, Perhitungan daya dukung tiang tunggal dapat dirumuskan sebagai berikut :

a. Daya dukung ujung (*end bearing*)

Berdasarkan metode *Meyerhoff*, perhitungan daya dukung ujung (*end bearing*) dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_b = A_b \cdot f_b \quad (1)$$

$$f_b = N_c \cdot C_u \quad (3)$$

Pada kedalaman 34 m

$$D = 60 \text{ cm}$$

$$D = 0,6 \text{ m}$$

$$N\text{-SPT} = 42$$

$$N_1 \text{ (10D ke atas)} = 29,86$$

$$N_2 \text{ (4D ke bawah)} = 44,2$$

$$\begin{aligned} N\text{-SPT}_{av} &= (28,09+44,2)/2 \\ &= 36,148 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_b &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,6^2 = 0,283 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$N_c = 9$$

$$C_u = \frac{2}{3} \times 36,148 = 24,1 \text{ ton/m}^2$$

$$f_b = 9 \cdot 24,1 = 217 \text{ ton/m}^2$$

Maka,

$$Q_b = 0,283 \times 217 = 61,293 \text{ ton}$$

b. Daya Dukung Selimut (*skin friction*)

Berdasarkan metode *Mayerhoff*, perhitungan daya dukung selimut (*skin friction*) dirumuskan sebagai berikut :

$$Q_s = A_s \cdot f_s \quad (5)$$

Untuk tanah berbutir halus atau *clay soil* (*c-soil*)

$$f_s = \alpha \cdot C_u \quad (6)$$

$$C_u = \frac{2}{3} \times N - \text{SPT}_{av} \quad (7)$$

Pada kedalaman 34 m deskripsinya adalah jenis tanah lempung, maka :

$$L = 34 \text{ m}$$

$$p = \pi \times 0,6 = 1,884 \text{ m}$$

$$A_s = 1,884 \times 34 = 64,056 \text{ m}^2$$

$$C_u = \frac{2}{3} \times 36,148 = 24,1 \text{ ton/m}^2$$

didapat $\alpha = 0,27$ (Gambar 2.7)

$$f_s = 0,27 \times 24,1 = 6,410 \text{ ton/m}^2$$

Maka,

$$Q_s = 64,056 \times 6,410 = 410,619 \text{ ton}$$

c. Daya Dukung Ijin (Q_a)

$$W_p = \text{Volume Tiang} \times \gamma_{\text{Beton}} \quad (9)$$

$$Q_{ult} = Q_b + Q_s - W_p \quad (12)$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{F_k} \quad (8)$$

Pada kedalaman 34 m

Konferensi Nasional Social dan Engineering Politeknik Negeri Medan Tahun 2023

$$\begin{aligned}
 L &= 34 \text{ m} \\
 A_b &= 0,283 \text{ m}^2 \\
 B_j \text{ beton} &= 2,4 \text{ ton} \\
 W_p &= 34 \times 0,283 \times 2,4 = 23,060 \text{ ton} \\
 Q_{ult} &= 61,293 + 410,619 - 23,060 = 448,852 \text{ ton} \\
 Q_a &= \frac{448,52}{3} = 149,617 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Data Kalendering

Dalam menganalisis daya dukung aksial tiang pancang berdasarkan data kalendering dilakukan dengan metode *Hilley* dapat dilihat pada lampiran 6.

Analisis daya dukung pondasi tiang pancang dengan metode *Hilley* Berdasarkan metode *Hilley*, perhitungan daya dukung pondasi tiang pancang dirumuskan sebagai berikut:

$$Q_u = \frac{EWr \cdot h}{s + \frac{1}{2}K} \times \frac{Wr + n^2 \cdot W_p}{Wr + W_p} \quad (10)$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{F_k} \quad (8)$$

Misalnya pada *Abutment 2 No 01*

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter tiang pancang (d)} &= 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m} \\
 \text{Panjang tiang} &= 34 \text{ m} \\
 \text{Mutu beton (f'c)} &= 50 \text{ Mpa} \\
 \text{Luas tiang pancang (A}_p\text{)} &= \frac{1}{4} \pi d^2 = \frac{1}{4} (3,14) (0,6)^2 = 0,283 \text{ m}^2 \\
 W_p &= (0,2825 \cdot 34) \cdot 2,4 = 23,060 \text{ ton} \\
 \text{Tinggi jatuh (h)} &= 2,5 \text{ m} \\
 \text{Penetrasi 10 pukulan terakhir (S)} &= 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m} \\
 \text{Besarnya rebound (K)} &= 0,02 \text{ m} \\
 \text{Efisiensi alat (Ef)} &= 1 \\
 \text{Berat hammer (Wr)} &= 6,5 \text{ ton} \\
 \text{Koefisien restitusi (n)} &= (0,4-0,5): \text{ diambil } 0,4 \\
 \text{Faktor keamanan (Fk)} &= 2,5
 \end{aligned}$$

Maka:

$$Q_u = \frac{1 \times 6,5 \times 2,5}{0,01 + \frac{1}{2} \times 0,02} \times \frac{6,5 + 0,4^2 \times 23,060}{6,5 + 23,060}$$

$$Q_u = 346,31 \text{ ton}$$

$$Q_a = \frac{346,31}{2,5}$$

$$Q_a = 138,524 \text{ ton}$$

Analisis Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Pile Driving Analyzer (PDA)

Data *Pile Driving Analyzer* (PDA) dapat dilihat pada lampiran 8.

Misalnya pada *pile no ABT 02-P01*

$$\begin{aligned}
 Q_b &= 112 \text{ ton} \\
 Q_s &= 208 \text{ ton} \\
 Q_{ult} &= Q_b + Q_s \\
 Q_u &= 112 + 208 \\
 &= 320 \text{ Ton}
 \end{aligned}$$

Maka,

$$\begin{aligned}
 Q_a &= \frac{Q_u}{2} \\
 &= \frac{320}{2} = 160 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Efisiensi Tiang Kelompok

Dengan perencanaan susunan tiang kelompok memakai formasi 13×4

Perhitungan E_g menggunakan data Kalendering

$$\begin{aligned} D &= 0,6 \text{ m} \\ s &= 1,5 \text{ m} \\ p &= \pi \times d \\ &= \pi \times 0,6 = 1,884 \text{ m} \\ m &= 13 \\ n &= 4 \\ \theta &= \arctan (D/s) \\ &= \arctan (0,6/2,1) \\ &= 15,945 \end{aligned}$$

Formula Sederhana

$$\begin{aligned} E_g &= \frac{2(m+n-2)s+4D}{p.m.n} \\ &= \frac{2(13+4-2)1,5+4D}{1,884 \cdot 13 \cdot 4} = 0,484 \end{aligned}$$

Formula *Converse – Labarre*

$$\begin{aligned} E_g &= 1 - \left[\frac{(n-1)m+(m-1)n}{90.m.n} \right] \theta \\ &= 1 - \left[\frac{(4-1)13+(13-1)4}{90 \cdot 13 \cdot 4} \right] 15,945 = 0,704 \end{aligned}$$

Formula *Seiler Keeney*

$$\begin{aligned} E_g &= \left[1 - \frac{36.s(m+n-2)}{(75.s^2-7)(m+n-1)} \right] + \frac{0,3}{m+n} \\ &= \left[1 - \frac{36 \cdot 1,5(13+4-2)}{(75 \cdot 2,1^2-7)(13+4-1)} \right] + \frac{0,3}{13+4} = 0,705 \end{aligned}$$

Formula *Los Angeles*

$$\begin{aligned} E_g &= 1 - \frac{D}{\pi.s.m.n} [m(n-1) + n(m-1) + (m-1)(n-1)\sqrt{2}] \\ &= 1 - \frac{0,6}{\pi \cdot 2,1 \cdot 13 \cdot 4} [13(4-1) + 4(13-1) + (13-1)(4-1)\sqrt{2}] = 0,574 \end{aligned}$$

Formula *Feld*

$$E_g = \frac{4\frac{13}{16} + 26\frac{11}{16} + 22\frac{8}{16}}{52} = 0,618$$

Jadi, yang dipakai efisiensi grup formula normal yaitu 0,484 E_g diambil hasil yang paling minimum.

Daya dukung kelompok tiang berdasarkan data Kalendering

$$Q_a = 138,524$$

$$n = 52$$

$$E_g = 0,484$$

Maka,

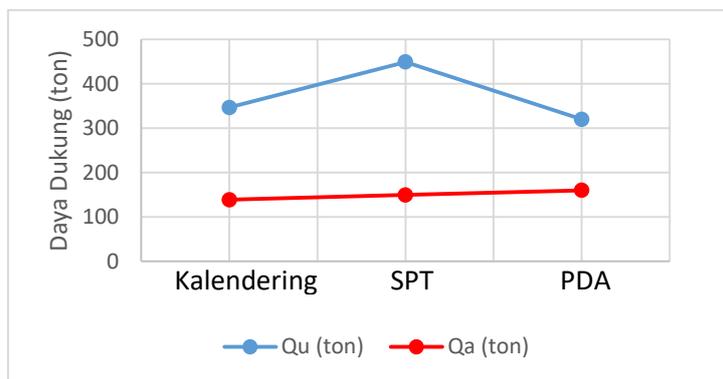
$$\begin{aligned} Q_g &= E_g n Q_u \\ &= 0,484 \cdot 138,524 \cdot 52 \\ &= 3485,153 \text{ ton} \end{aligned} \tag{11}$$

Adapun hasil dari perbandingan daya dukung pondasi kelompok tiang dapat dilihat pada tabel 1

Tabel 1. Perbandingan Daya Dukung Pondasi Kelompok Tiang

Perbandingan daya dukung pondasi kelompok tiang					
Metode Pengujian	Qu	Qa	Abutment 2		
			Eg	n	Qg
Kalendering	346.31	138.523	0.484	52	3485.154
SPT	448.85	149.617	0.484	52	3860.781

PDA	320	160	0.484	52	4025.478
-----	-----	-----	-------	----	----------



Gambar 7. Grafik Perbandingan Daya Dukung

Sumber : Peneliti, 2023

Berdasarkan grafik diatas hasil pengujian kalendering dapat diperoleh hasil $Q_u = 346.309$ ton dan $Q_a = 138.523$ ton dari hasil pengujian SPT (*Standard Penetration Test*) diperoleh $Q_u = 448.85$ ton dan $Q_a = 149.617$ ton sedangkan berdasarkan hasil pengujian PDA (*Pile Driving Analyzer*) test di peroleh hasil $Q_u = 320$ ton dan $Q_a = 160$ ton.

SIMPULAN

Adapun simpulan yang didapat dari pembahasan sebelumnya adalah hasil perhitungan daya dukung tiang tunggal yang direncanakan pada kedalaman 34 m, dengan menggunakan diameter tiang 60 cm, menggunakan data *Standart Penetration Test (SPT)* memakai perhitungan metode *Mayerhoff* adalah $Q_a = 149,617$ ton, menggunakan data Kalendering dengan menggunakan metode *Hilley* adalah $Q_a = 138,523$ ton, menggunakan data *Pile Driving Analyzer (PDA)* adalah $Q_a = 160$ ton. Desain formasi tiang kelompok yang aman untuk menahan kolom pada *abutment* adalah masing-masing dengan formasi kelompok tiang yang terdiri dari 52 tiang pondasi dengan ukuran diameter 60 cm dan kedalaman 34 m. Dengan formasi tersebut kelompok tiang dapat memikul beban sebesar 3485,153 ton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya yang tiada terhingga, kepada Politeknik Negeri Medan, P3M Politeknik Negeri Medan, DIPA Politeknik Negeri Medan, Dosen Pembimbing, keluarga peneliti, yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini dan seluruh pihak yang telah mendukung peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowels J. (1991). *Analisa dan Design Pondasi Edisi Ketiga Jilid 2*. Erlangga.
- Bowels J.E. (1984). *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. USA: McGraw-Hill,Inc.
- Hanafi, M. B., & Budi Setiawan, S. T. (2015). *Efisiensi Kelompok Tiang Pancang* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan Fondasi bagian II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. (2019). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- M.J. Tomlinson. (1997). *Pile Design and Construction Practise*.
- Sardjono, I. (1998). *Pondasi Tiang Pancang Jilid 1*. Surabaya: Sinar Wijaya.
- Sari, R. A. & Sarjono Puro, M.T. (2021). *UJI PEMBEBANAN PADA PONDASI (load test pile)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Riau).

