

ANALISIS PENGARUH DIAMETER TIANG TERHADAP DAYA DUKUNG LATERAL FONDASI TIANG TUNGGAL DENGAN PEMBEBANAN STATIK DAN SIKLIK

David Jose¹ dan Aniek Prihatiningsih²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
djosewijaya@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
aniekp@ft.untar.ac.id

Masuk: 09-01-2024, revisi: 10-01-2024, diterima untuk diterbitkan: 01-02-2024

ABSTRACT

The pile foundation is a frequently chosen option in constructing multi-story buildings, where the vertical load is substantial and needs to be transferred to hard soil/strata. Multi-story structures impose significant loads, and these loads are directed into the hard soil/strata using pile foundations. Apart from multi-story buildings, pile foundations can also be employed to resist lateral loads such as seismic forces, wind, waves, and others. Therefore, this research is conducted to gain a more thorough understanding of the influence of pile diameter on the lateral load-carrying capacity of a single-pile foundation, both under static and cyclic loading conditions. The study involves piles with diameters of 0.3 m, 0.6 m, and 1 m, under fixed-head conditions, with a safety factor of 2.5. The comparison is made regarding static lateral load-carrying capacity using the Broms method, Reese-Matlock method, and the p-y curve method, as well as cyclic lateral load-carrying capacity using the SOLCYP-G method. From this study, it is concluded that the diameter of the pile does not affect the reduction factor of lateral load-bearing capacity due to cyclic loading; instead, it is the load itself that determines how much the lateral load-bearing capacity of the pile decreases.

Keywords: Broms method; Reese-Matlock method; lateral load; single pile foundations; cyclic load

ABSTRAK

Fondasi tiang merupakan pilihan yang sering digunakan dalam mendirikan bangunan bertingkat, dimana bangunan bertingkat memberikan beban yang sangat besar dan beban tersebut disalurkan ke tanah keras / *hard strata* dengan menggunakan fondasi tiang. Selain pada bangunan bertingkat, fondasi tiang juga dapat digunakan untuk menahan beban lateral seperti beban gempa, angin, ombak, dan lain-lain. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk memahami lebih saksama mengenai pengaruh diameter tiang terhadap nilai daya dukung lateral fondasi tiang tunggal baik dalam kondisi pembebanan statik maupun siklik. Penelitian dilakukan pada tiang tunggal berdiameter 0,3 m, 0,6 m, dan 1 m dengan kondisi *fixed-head* dan *safety factor* bernilai 2,5. Perbandingan dilakukan terhadap nilai daya dukung lateral statik dengan menggunakan metode Broms, metode Reese-Matlock, dan metode Kurva P-Y, dan daya dukung lateral siklik dengan metode SOLCYP-G. Dari penelitian ini, disimpulkan bahwa diameter tiang tidak mempengaruhi faktor reduksi daya dukung akibat pembebanan siklik, melainkan beban sendiri yang menentukan seberapa berkurangnya nilai daya dukung lateral tiang.

Kata kunci: Metode Broms; metode Reese-Matlock; beban lateral; fondasi tiang tunggal; beban siklik

1. PENDAHULUAN

Fondasi dalam adalah elemen krusial dalam dunia konstruksi yang memainkan peran sentral dalam memastikan stabilitas dan keberlanjutan bangunan. Disebut fondasi dalam karena fondasi ini ditempatkan pada lapisan tanah yang lebih dalam, jauh di bawah permukaan tanah. Fondasi ini dirancang untuk menanggung beban bangunan bertingkat dan mendistribusikannya dengan aman ke lapisan tanah keras yang memiliki daya dukung lebih tinggi. Fondasi dalam biasanya digunakan untuk bangunan dengan beban berat, seperti gedung bertingkat tinggi, jembatan, atau struktur industri besar. Dengan fondasi dalam, beban bangunan ditransfer melalui berbagai elemen penopang, seperti tiang pancang, bore pile ke lapisan tanah yang lebih stabil atau bahkan batuan di bawahnya (Bowles, 2001).

Untuk mendesain sebuah fondasi yang kokoh, diperlukan perhatian terhadap beberapa jenis pembebanan dikarenakan sifatnya yang berbeda-beda. Beban aksial bersifat sejajar dengan garis sumbu batang, sehingga bersifat menekan/menarik dan menghasilkan gaya dalam normal. Beban lateral bersifat tegak lurus dengan garis sumbu batang, berupa gaya geser dan menghasilkan gaya dalam lintang. Selain itu, beban dapat dibedakan menjadi beban statis/diam dan beban dinamis/berubah-ubah (Tomlinson & Woodward, 2008).

Beban aksial adalah gaya atau tekanan yang diterapkan secara langsung pada sumbu utama sebuah struktur, baik dalam arah vertikal atau horizontal. Beban ini bergerak sepanjang sumbu tengah struktur dan dapat menyebabkan regangan atau kompresi pada elemen struktural. Contoh beban aksial adalah beban gravitasi yang disebabkan oleh berat sendiri suatu bangunan (Poulos & Davis, 1980).

Beban lateral adalah beban yang diterapkan pada struktur dalam arah horizontal. Beban ini cenderung mempengaruhi stabilitas lateral struktur, seperti daya tahan terhadap angin kencang atau gempa bumi. Beban lateral dapat diakibatkan oleh angin, gempa bumi, atau aksi eksternal lainnya yang bekerja secara horizontal pada struktur (Poulos & Davis, 1980).

Menurut Gunawan (1991), secara umum fondasi dibagi menjadi dua jenis, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dangkal merupakan fondasi yang hanya mampu menerima beban relatif kecil dan secara langsung menerima beban bangunan. Sedangkan fondasi dalam adalah fondasi yang mampu menerima beban bangunan yang besar dan meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batuan yang sangat dalam. Pemilihan jenis fondasi dapat didasarkan pada beberapa aspek (Sardjono, 1988):

- Fungsi bangunan atas yang akan dipikul oleh fondasi.
- Besarnya beban dan beratnya bangunan atas.
- Keadaan tanah dimana bangunan akan didirikan.
- Biaya fondasi dibandingkan dengan bangunan atas.

Fondasi tiang juga dapat digunakan sebagai *friction pile* pada fondasi rakit untuk mengurangi nilai penurunan yang terjadi, hal ini biasa dilakukan dengan cara menambah tiang pada bagian bawah fondasi rakit agar nilai penurunan tidak melewati batas ijin (Laksmna & Prihatiningsih, 2020).

Penelitian ini membandingkan nilai daya dukung lateral fondasi tiang dengan diameter tiang sebagai variabel bebas, panjang tiang dan parameter tanah sebagai variabel kontrol dan kondisi pembebanan yang digunakan adalah pembebanan statik dan siklik. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh dari diameter tiang terhadap nilai daya dukung lateral fondasi tiang tunggal, baik akibat beban statik maupun beban siklik. Dengan diadakannya penelitian ini, diharapkan pengaruh dari pembebanan siklik lebih dipertimbangkan dalam perencanaan fondasi tiang pada daerah yang rawan terjadi beban siklik, seperti pada daerah *offshore*.

Metode Broms

Daya dukung lateral fondasi tiang tunggal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Prof. Broms pada tahun 1964. Metode perhitungan ini menggunakan penyederhanaan diagram tekanan tanah dengan menganggap bahwa sepanjang tiang tersebut tahanan tanah mencapai nilai ultimit. Berikut ini adalah beberapa keuntungan menggunakan metode Broms:

- Dapat digunakan untuk tiang panjang maupun tiang pendek.
- Dapat digunakan untuk kondisi *free-head* maupun *fixed-head*.

Selain itu, ada pula beberapa kerugian dalam penggunaan metode Broms, diantaranya yaitu:

- Hanya berlaku pada tanah homogen.
- Tidak dapat digunakan untuk tanah berlapis-lapis.

Menurut Broms (1964) perhitungan defleksi lateral tiang pada tanah kohesif dapat dihitung menggunakan Persamaan 1-2.

$$\beta = \left(\frac{Kh \cdot d}{4 \cdot Ep \cdot Ip} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

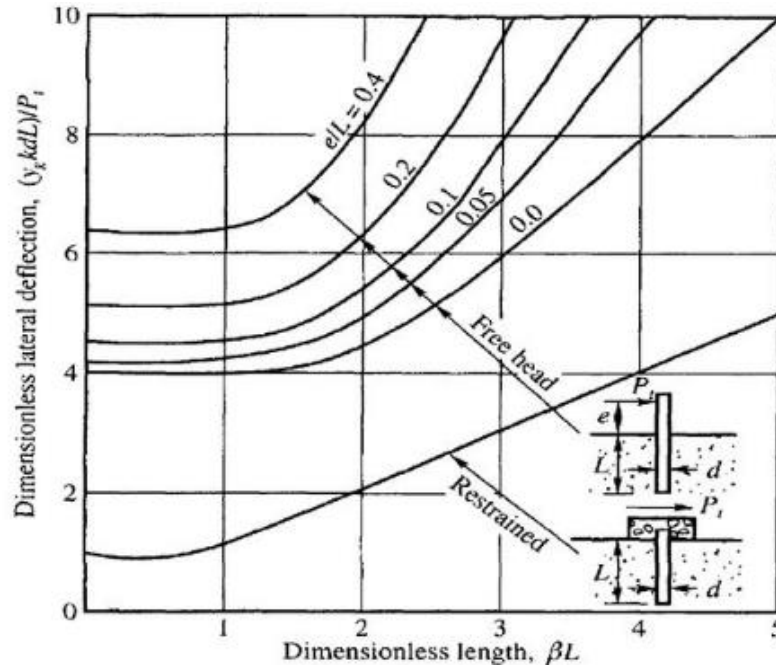
$$kh = \frac{K_1}{1,5} \quad (2)$$

Nilai k_1 dapat menggunakan nilai rekomendasi oleh Terzaghi (1955) pada Tabel 1.

Tabel 1. Korelasi nilai k_1 dengan C_u (Terzaghi, 1955)

| Konsistensi | Kaku | Sangat Kaku | Keras |
|----------------------------|-----------|-------------|-------|
| C_u (kN/m ²) | 100 – 200 | 200 – 400 | > 400 |
| k_1 (MN/m ³) | 18 – 36 | 36 – 72 | > 72 |
| k_1 rekomendasi | 27 | 54 | > 108 |

Nilai βL diplot ke dalam Gambar 1 dan didapat nilai $y_x k d L / P$, dan P dapat dicari dengan memasukkan nilai y_x sebesar 6 mm untuk gempa kuat.



Gambar 1. Defleksi lateral tiang pada tanah kohesif (Broms, 1964)

Metode Reese-Matlock

Teori Reese-Matlock menggunakan defleksi lateral izin untuk menentukan kapasitas lateral ultimit dengan menggunakan pendekatan reaksi *subgrade*. Pada metode ini, tiang dibedakan menjadi tiang kaku/pendek dan tiang elastik/panjang serta kondisi kepala tiang terjepit dan bebas.

Untuk kepala tiang terjepit (*fixed head*), defleksi y_x dan momen M_x dapat dihitung dengan Persamaan 3-6.

$$y_x = F_y \frac{H \cdot T^3}{E_p I_p} \quad (3)$$

$$M_x = F_m \cdot H \cdot T \quad (4)$$

$$z = x/T \quad (5)$$

$$T = \left(\frac{E_p I_p}{\eta_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (6)$$

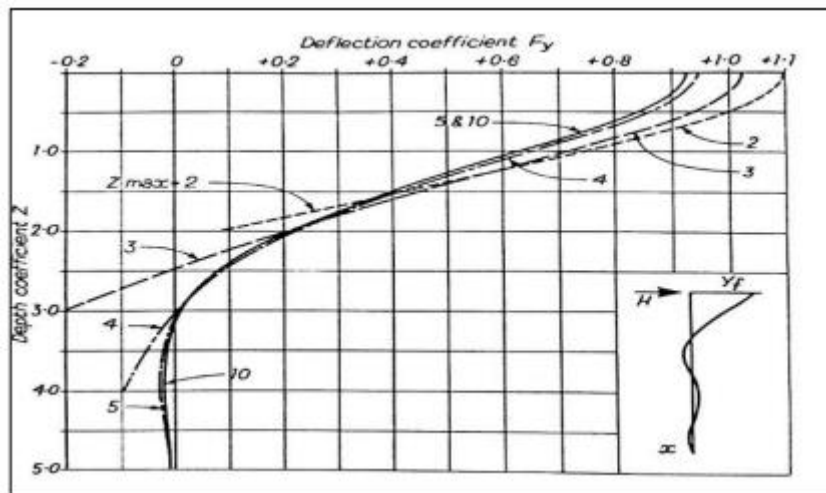
dengan H = beban lateral (kN), T = faktor kekakuan tiang, z = koefisien kedalaman, F_y dan F_m = koefisien Reese-Matlock kepala tiang terjepit.

Nilai koefisien Reese-Matlock (F_y dan F_m) untuk kepala tiang terjepit didapat dengan menggunakan grafik pada Gambar 2-3 dengan cara memasukkan nilai koefisien kedalaman z .

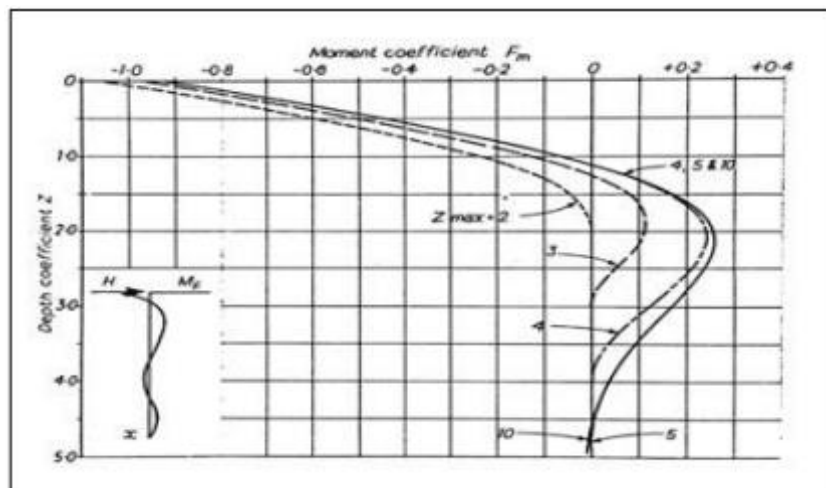
Metode kurva P-Y

Metode yang paling sering digunakan dalam perhitungan daya dukung lateral fondasi tiang adalah metode Kurva P-Y, terdapat rumus berbeda untuk kondisi tanah yang berbeda. Karena penelitian dilakukan pada tanah kohesif kaku di atas permukaan air tanah, maka digunakan rumus seperti pada Gambar 4.

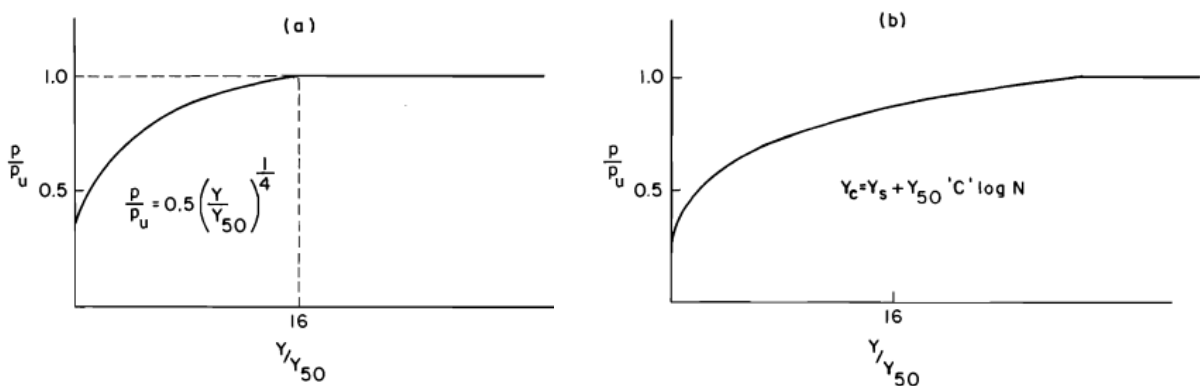
P_u = tahanan ultimit tanah (kN), y_{50} = defleksi tiang saat 50% kuat geser tanah [$2,5 \epsilon_{50} d$], ϵ_{50} = regangan saat 50% kuat geser tanah (didapat dari uji UU *triaxial compression*), d = lebar tiang (m), y_s = defleksi statis, $C = 9,6 R^4$, N = jumlah siklus beban, $R = \frac{p}{p_u}$.



Gambar 2. Koefisien F_y untuk tiang *fixed head* (Reese & Matlock, 1956)



Gambar 3. Koefisien F_m untuk tiang *fixed head* (Reese & Matlock, 1956)



Gambar 4. Grafik p - y tanah lempung kaku di atas muka air tanah (a) pembebanan statis dan (b) pembebanan siklik (Reese & Meyer, 1979)

Metode SOLCYP-G

Untuk memperhitungkan pengaruh pembebanan siklik digunakan metode SOLCYP yang dikembangkan pada tahun 2013 berdasarkan hasil pengujian pada fondasi tiang pada lapangan dengan skala nyata maupun di laboratorium

dengan skala model (Puech & Garnier, 2017). Metode ini menyebutkan bahwa pengaruh pembebanan siklik dapat diperhitungkan dalam desain fondasi tiang dengan menaikkan defleksi yang terjadi pada tiang setelah dibebani lateral siklik pada siklus ke-N dengan Persamaan 7-10.

- Untuk kondisi tanah pasir:

$$\frac{y_N}{y_1} = 1 + \frac{0,235}{CR} \log(N) \left(\frac{H_c}{H_{max}} \right)^{0,35} \quad (7)$$

$$CR = \left(\frac{E_p I_p}{(E_p I_p)_{fl}} \right)^{1/5} \quad (8)$$

Dengan CR adalah koefisien kekakuan untuk menentukan tipe tiang antara fleksibel atau kaku pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai koefisien kekakuan CR (Puech & Garnier, 2017)

| Tipe | Kekakuan tiang $E_p I_p$ | Koefisien Kekakuan CR |
|-----------|---|--|
| Fleksibel | $E_p I_p \leq (E_p I_p)_{fl}$ | CR = 1 |
| Menengah | $(E_p I_p)_{fl} \leq E_p I_p \leq (E_p I_p)_{ri}$ | $CR = \left(\frac{E_p I_p}{(E_p I_p)_{fl}} \right)^{1/5}$ |
| Kaku | $E_p I_p > (E_p I_p)_{ri}$ | $CR = \left(\frac{E_p I_p}{(E_p I_p)_{fl}} \right)^{1/5}$ |

Keterangan: ri adalah *rigid* dan fl adalah *flexible*

- Untuk kondisi tanah lempung digunakan persamaan 9 & 10:
 - *Normally consolidated clays* dan *slightly overconsolidated saturated clays*

$$\frac{y_N}{y_1} = 1,1N^{0,5 \frac{H_c}{H_{max}}} \quad (9)$$

- *Unsaturated overconsolidated clays*

$$\frac{y_N}{y_1} = 1,1N^{0,16 \frac{H_c}{H_{max}}} \quad (10)$$

Untuk mencari nilai momen maksimum dan kedalaman dimana momen maksimum terjadi setelah dibebani lateral siklik pada siklus ke-N dapat menggunakan Persamaan 11-13:

- Untuk tanah pasir

$$\frac{M_{max,N}}{M_{max,1}} = 1 + \frac{0,094}{CR} \log N \left(\frac{H_c}{H_{max}} \right)^{0,35} \quad (11)$$

- Untuk tanah lempung *overconsolidated* dan *normally consolidated*

$$\frac{M_{max,N}}{M_{max,1}} = N^{0,25 \frac{H_c}{H_{max}}} \quad (12)$$

$$\frac{Z_{M_{max,N}}}{Z_{M_{max,1}}} = 1,1 \times N^{0,22 \frac{H_c}{H_{max}}} \quad (13)$$

2. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan laporan hasil pengujian tanah pada sebuah proyek di Cilangkap, Jakarta Timur. Sifat tanah pada penelitian ini adalah tanah kohesif silt dengan konsistensi kaku hingga sangat kaku. Laporan hasil pengujian tanah tersebut tidak terdapat hasil uji laboratorium sehingga data yang diperlukan dapat dicari dengan menggunakan korelasi dengan parameter yang dimiliki. Dari studi literatur, data-data hasil pengujian diolah untuk mendapatkan parameter desain tanah yang dibutuhkan untuk digunakan pada analisis.

Perhitungan daya dukung lateral statik dan siklik menggunakan data yang sudah diolah untuk tiga diameter tiang telah direncanakan, yaitu diameter 0,3 meter, 0,6 meter, dan 1 meter. Kemudian analisis membandingkan nilai yang didapat dari beberapa metode dalam satu tabel dan juga grafik untuk membuat kesimpulan dan saran dari hasil penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

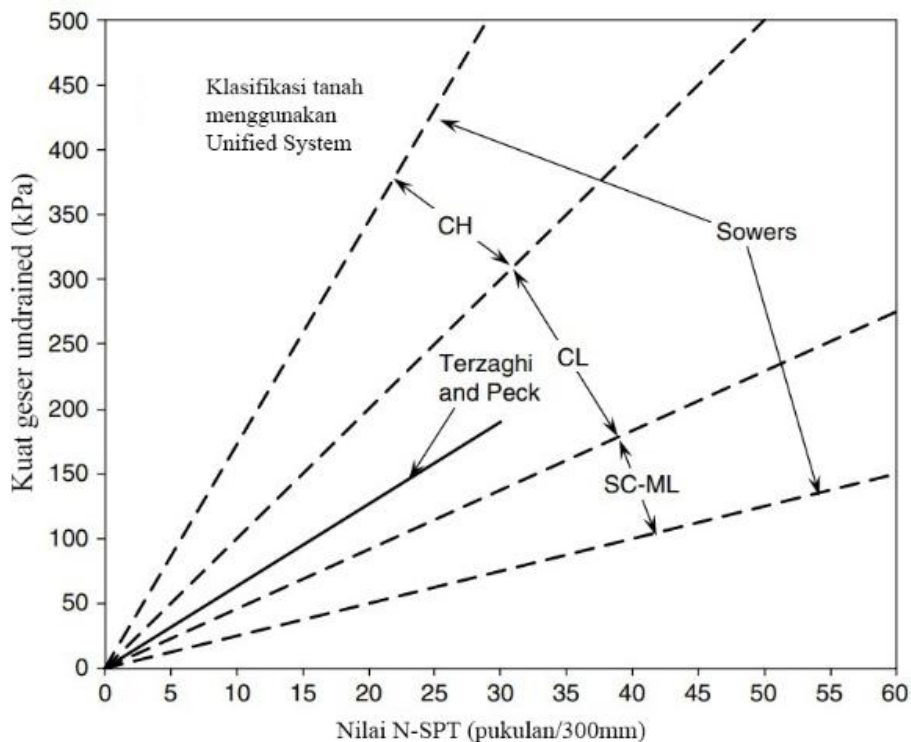
Parameter tanah

Dari hasil pengujian tanah diperoleh *boring log* tanah pada Tabel 3.

Tabel 3. *Boring log* proyek X di Cilangkap, Jakarta Timur

| Kedalaman (m) | N-SPT (pukulan/30cm) | S_u (kN/m ²) | γ_{sat} (kN/m ³) |
|---------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 0-5 | 15 | 90 | 20 |
| 5-10 | 50 | 300 | 22 |
| 10-15 | 30 | 180 | 22 |
| 15-20 | 50 | 300 | 22 |
| 20-30 | 60 | 360 | 22 |

Untuk perhitungan atau analisis digunakan parameter kuat geser S_u , dan berat jenis tanah. Nilai berat jenis tanah menggunakan nilai tipikal, sedangkan nilai kuat geser S_u didapat dengan korelasi dengan N-SPT menggunakan grafik pada Gambar 5.



Gambar 5. Korelasi pendekatan antara kuat geser dengan nilai N-SPT (Terzaghi & Peck, 1967; Sowers 1979)

Data desain tiang

Fondasi tiang didesain dengan panjang 15 m agar duduk di atas tanah keras pada kedalaman 15 m, dengan f_c' 25 MPa dengan parameter seperti Tabel 4.

Perhitungan daya dukung lateral akibat pembebanan statik

Tabel 5 adalah parameter desain tiang yang digunakan, dengan nilai tersebut maka dapat dicari nilai dari β dan juga βL yang diperlukan dalam perhitungan dengan metode Broms.

Didapat nilai H_u dan H_{all} dengan metode Broms pada Tabel 6.

Tabel 4. Data fondasi tiang

| Parameter | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|
| L_p (m) | 15 | 15 | 15 |
| d_p (m) | 0,3 | 0,6 | 1 |
| f_c' (MPa) | 25 | 25 | 25 |
| E_p (MPa) | 23500 | 23500 | 23500 |
| I_p (m ⁴) | 0,000397 | 0,006361 | 0,049087 |
| M_n (kNm) | 44,37 | 357,17 | 1570,73 |

Tabel 5. Parameter desain tiang

| Parameter | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|
| L_p (m) | 15 | 15 | 15 |
| d_p (m) | 0,3 | 0,6 | 1 |
| f_c' (MPa) | 25 | 25 | 25 |
| E_p (MPa) | 23500 | 23500 | 23500 |
| I_p (m ⁴) | 0,000397 | 0,006361 | 0,049087 |
| β | 0,5570 | 0,3312 | 0,2258 |
| βL | 8,35 | 4,96 | 3,38 |

Tabel 6. Hasil perhitungan daya dukung lateral dengan metode Broms

| | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|--------------------------|-----------|-----------|----------|
| βL | 0,6579 | 0,3912 | 0,2667 |
| $y_{kdL/P}$ | 8 | 5,5 | 3,95 |
| y_x (mm) | 6 | 6 | 6 |
| K (MN/m ³) | 23,33333 | 23,33333 | 23,33333 |
| d (m) | 0,3 | 0,6 | 1 |
| L (m) | 15 | 15 | 15 |
| H_u (kN) | 78,75 | 229,09 | 531,65 |
| H_{all} (SF=2,5) | 31,50 | 91,64 | 212,66 |
| H_{all} (ton) | 3,15 | 9,16 | 21,27 |

Untuk fondasi tiang yang digunakan pada penelitian ini, didapati nilai koefisien F_m dan F_y seperti pada Tabel 7.

Tabel 7. Koefisien F_m dan F_y

| x | D = 0,3 m (T = 0,8213) | | | D = 0,6 m (T = 1,43) | | | D = 1 m (T = 2,1518) | | |
|----|------------------------|--------|-------|----------------------|--------|-------|----------------------|--------|-------|
| | z | F_y | F_m | z | F_y | F_m | z | F_y | F_m |
| 0 | 0 | 0,91 | -0,9 | 0 | 0,91 | -0,9 | 0 | 0,91 | -0,9 |
| 1 | 1,1643 | 0,6 | -0,1 | 0,6687 | 0,8 | -0,35 | 0,4444 | 0,9 | -0,55 |
| 2 | 2,3287 | 0,2 | 0,25 | 1,3375 | 0,5 | 0,05 | 0,8888 | 0,73 | -0,2 |
| 3 | 3,4931 | 0 | 0,18 | 2,006 | 0,25 | 0,25 | 1,3332 | 0,5 | 0,05 |
| 4 | 4,6575 | -0,025 | 0,05 | 2,6750 | 0,1 | 0,23 | 1,7777 | 0,35 | 0,2 |
| 5 | 5,821 | 0 | 0 | 3,3438 | 0 | 0,15 | 2,2221 | 0,2 | 0,25 |
| 6 | 6,9863 | 0 | 0 | 4,0126 | -0,025 | 0,08 | 2,6665 | 0,1 | 0,23 |
| 7 | 8,1507 | 0 | 0 | 4,6813 | -0,02 | 0,05 | 3,1109 | 0,05 | 0,2 |
| 8 | 9,3151 | 0 | 0 | 5,3501 | 0 | 0 | 3,5554 | 0 | 0,15 |
| 9 | 10,4795 | 0 | 0 | 6,0189 | 0 | 0 | 3,9998 | -0,025 | 0,07 |
| 10 | 11,6439 | 0 | 0 | 6,6877 | 0 | 0 | 4,4442 | -0,02 | 0,03 |
| 11 | 12,8083 | 0 | 0 | 7,3564 | 0 | 0 | 4,8886 | -0,01 | 0 |
| 12 | 13,9727 | 0 | 0 | 8,0252 | 0 | 0 | 5,3331 | 0 | 0 |
| 13 | 15,1371 | 0 | 0 | 8,6940 | 0 | 0 | 5,7775 | 0 | 0 |
| 14 | 16,3015 | 0 | 0 | 9,3627 | 0 | 0 | 6,2219 | 0 | 0 |
| 15 | 17,4659 | 0 | 0 | 10,0315 | 0 | 0 | 6,6663 | 0 | 0 |

Didapat nilai H_u dan H_{all} dengan metode Reese-Matlock dengan batasan y seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil perhitungan daya dukung lateral metode Reese-Matlock dengan batasan $y = 6 \text{ mm}$ ($SF = 2,5$)

| Tiang | H_u (kN) | H_{all} (kN) | H_{all} (ton) | M_u (kNm) | M_n (kNm) |
|-----------|------------|----------------|-----------------|-------------|-------------|
| D = 0,3 m | 111,1944 | 44,4777 | 4,4477 | 82,1944 | 44,37 |
| D = 0,6 m | 337,0784 | 134,8313 | 13,4831 | 433,824 | 357,17 |
| D = 1 m | 763,2889 | 305,3155 | 30,5315 | 1478,26 | 1570,73 |

M_u pada tiang D = 0,3 m dan 0,6 m melebihi nilai M_n tiang sehingga tiang akan mengalami kegagalan akibat beban momen yang berlebih sehingga nilai H_u untuk tiang D = 0,3 m dan 0,6 m menggunakan perhitungan dengan batasan nilai M_n .

Didapati nilai H_u dan H_{all} metode Reese-Matlock dengan batasan M_n seperti pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil perhitungan daya dukung statik lateral metode Reese-Matlock dengan batasan M_n ($SF = 2,5$)

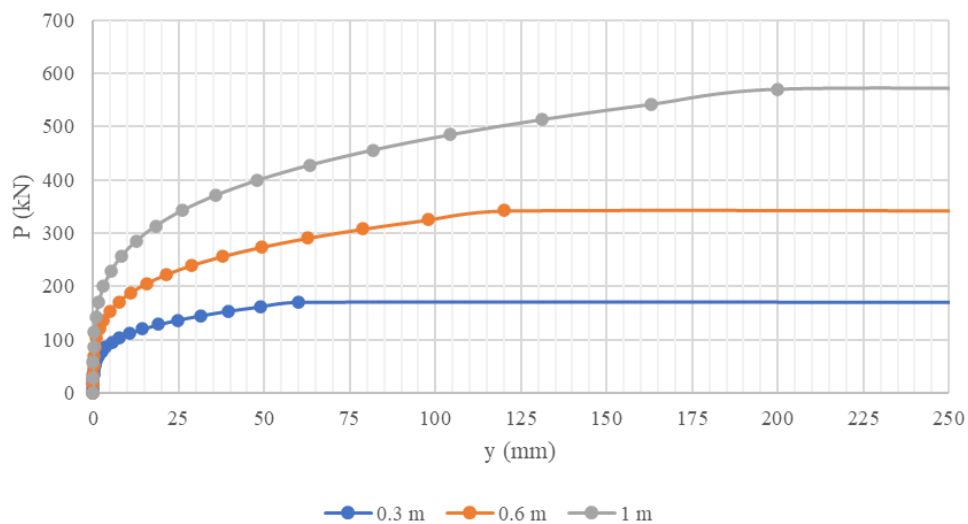
| Tiang | H_u (kN) | H_{all} (kN) | H_{all} (ton) | y_x (mm) |
|-----------|------------|----------------|-----------------|------------|
| D = 0,3 m | 60,0247 | 24,0099 | 2,4009 | 3,2389 |
| D = 0,6 m | 277,5185 | 111,0074 | 11,1007 | 4,9398 |
| D = 1 m | 811,039 | 324,4156 | 32,4415 | 6,3753 |

Pada Kurva P-Y dibutuhkan nilai P_u di kepala tiang, nilai y_{50} dan nilai ϵ_{50} untuk dilakukan perhitungan, pada penelitian ini kurva yang digunakan adalah kurva untuk tanah lempung kaku diatas permukaan air dengan nilai ϵ_{50} adalah 0,005. Nilai parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti pada Tabel 10.

Tabel 10. Nilai parameter untuk perhitungan Kurva P-Y

| | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|------------|-----------|-----------|---------|
| P_u (kN) | 171 | 342 | 570 |
| y_{50} | 0,00375 | 0,0075 | 0,0125 |

Dari parameter tersebut maka dapat digambarkan Kurva P-Y masing-masing tiang seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Kurva P-Y

Didapati nilai H_u dan H_{all} metode Kurva P-Y seperti pada Tabel 11.

Perhitungan daya dukung lateral akibat pembebanan siklik

Beban siklik digunakan beban ekstrim yaitu beban siklik *one-way* $H_c/H_{max} = 0,5$ dengan jumlah siklus $N = 1000$, metode yang digunakan merupakan metode SOLCYP-G untuk tanah lempung dengan validitas metode ini yaitu hingga $N = 1000$ dan beban bersifat *one-way*/satu arah.

Tabel 11. Daya dukung lateral menggunakan metode Kurva P-Y dengan batasan $y = 6$ mm (SF = 2,5)

| | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|-----------------|-----------|-----------|----------|
| H_u (kN) | 96,1603 | 161,7218 | 237,2221 |
| H_{all} (kN) | 38,4641 | 64,6887 | 94,8888 |
| H_{all} (ton) | 3,8464 | 6,4688 | 9,4888 |

Digunakan Persamaan 10 untuk *unsaturated overconsolidated clays*, sehingga didapat nilai y_N/y_1 adalah:

$$\frac{y_N}{y_1} = 1,1(1000)^{0,16(0,5)} = 1,9115$$

Dengan memasukkan nilai $y_N = 6$ mm maka didapat nilai y_1 sebagai batasan defleksi kepala tiang pada kondisi pembebanan siklik:

$$\frac{y_N}{y_1} = 1,9115 \rightarrow y_1 = \frac{6}{1,9115} = 3,1387 \text{ mm}$$

Tabel 12-13 berikut adalah hasil perhitungan daya dukung lateral dari ketiga metode akibat pembebanan siklik dengan menggunakan SF = 2,5.

Tabel 12. Hasil perhitungan daya dukung lateral akibat pembebanan siklik dalam satuan kN

| H_u (kN) | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|---------------|-----------|-----------|----------|
| Broms | 41,20 | 119,8413 | 278,1127 |
| Reese-Matlock | 58,17 | 176,3313 | 399,2892 |
| Kurva P-Y | 81,78 | 137,5372 | 201,747 |

Tabel 13. Daya dukung lateral ijin akibat pembebanan siklik dalam satuan kN (SF = 2,5)

| H_{all} (kN) | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m |
|----------------|-----------|-----------|----------|
| Broms | 16,48 | 47,9365 | 111,2451 |
| Reese-Matlock | 23,27 | 70,5325 | 159,7157 |
| Kurva P-Y | 32,71 | 55,0148 | 80,6988 |

Summary

Setelah dilakukan analisis untuk semua diameter tiang, maka diperoleh data daya dukung lateral statik dan siklik seperti pada Tabel 14-15.

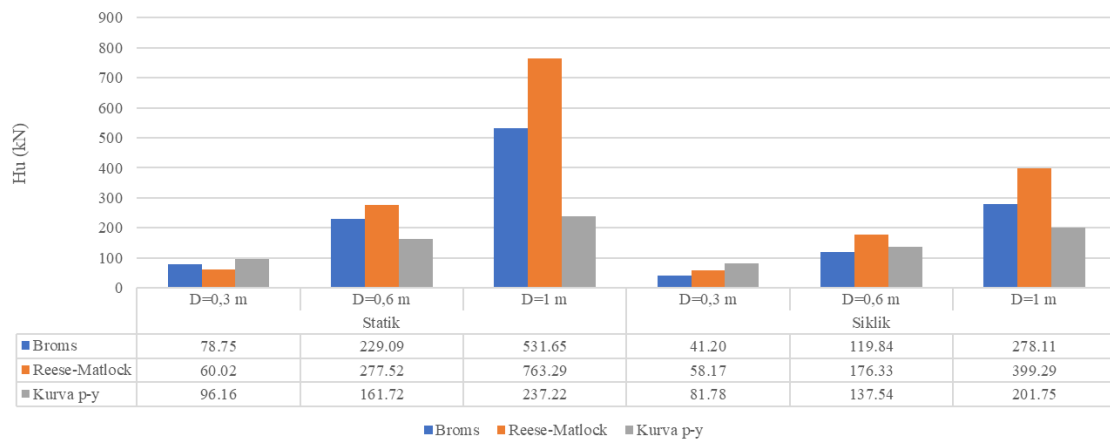
Tabel 14. Perbandingan daya dukung lateral (H_u) dengan beban statik dan siklik dalam satuan kN

| | Statik | | | Siklik | | | Faktor Reduksi Siklik |
|---------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|
| | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m | |
| Broms | 78,75 | 229,0909 | 531,6456 | 41,20 | 119,8413 | 278,1127 | 0,5231 |
| Reese-Matlock | 60,0247 | 277,5185 | 763,2889 | 58,17 | 176,3313 | 399,2892 | 0,5231 |
| Kurva P-Y | 96,1603 | 161,7218 | 237,2221 | 81,78 | 137,5372 | 201,747 | 0,8505 |

Tabel 15. Perbandingan daya dukung lateral (H_{all}) dengan beban statik dan siklik dalam satuan kN

| | Statik | | | Siklik | | | Faktor Reduksi Siklik |
|---------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|
| | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m | D = 0,3 m | D = 0,6 m | D = 1 m | |
| Broms | 31,5000 | 91,6364 | 212,6582 | 16,4782 | 47,9365 | 111,2451 | 0,5231 |
| Reese-Matlock | 24,0099 | 111,0074 | 305,3156 | 23,2671 | 70,5325 | 159,7157 | 0,5231 |
| Kurva P-Y | 38,4641 | 64,6887 | 94,8888 | 32,7120 | 55,0149 | 80,6988 | 0,8505 |

Nilai H_u dari ketiga metode kemudian digambarkan dalam bentuk grafik seperti Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan daya dukung lateral dengan beban statik dan siklik pada tiang tunggal

Dengan menggunakan metode SOLCYP-G didapati nilai daya dukung siklik lebih rendah dari daya dukung statik dengan nilai reduksi sebesar 0,5231 pada metode Broms dan Reese-Matlock, sedangkan pada metode Kurva P-Y nilai reduksi sebesar 0,8505. Hal ini disebabkan oleh perumusan Broms dan Reese-Matlock dimana variabel y (defleksi) berpangkat 1, sedangkan pada Kurva P-Y, variabel y (defleksi) berpangkat $\frac{1}{4}$.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh berdasarkan hasil analisis dalam penelitian ini adalah:

- Nilai daya dukung lateral ketiga metode berbeda satu dengan lainnya karena berbedanya variabel yang diperhitungkan. Pada metode Broms variabel yang diperhitungkan merupakan *subgrade modulus*, panjang tiang, lebar tiang, kekakuan tiang, serta parameter penampang tiang. Metode Reese-Matlock hanya memperhitungkan variabel kekakuan tiang dan *subgrade modulus* dengan nilai T , dan berpusat di koefisien yang diberikan oleh Matlock. Sedangkan pada metode Kurva P-Y, variabel yang digunakan bergantung pada kondisi tanah, pada kondisi tanah lempung kaku diatas permukaan air variabel yang digunakan hanyalah diameter tiang dan ϵ_{50} dimana nilai ϵ_{50} menggunakan nilai tipikal berdasarkan nilai S_u tanah.
- Faktor reduksi siklik pada metode Broms dan Reese-Matlock bernilai 0,5231 sedangkan pada Kurva P-Y bernilai 0,8505. Hal ini disebabkan oleh perumusan Broms dan Reese-Matlock dimana variabel y (defleksi) berpangkat 1, sedangkan pada Kurva P-Y, variabel y (defleksi) berpangkat $\frac{1}{4}$.
- Diameter tiang merupakan faktor yang tidak mempengaruhi nilai reduksi daya dukung lateral akibat pembebanan siklik. Melainkan, nilai reduksi daya dukung lateral akibat pembebanan siklik dipengaruhi oleh nilai H_c/H_{max} dari beban tersebut dan juga jumlah siklus N yang terjadi.
- Faktor reduksi daya dukung lateral akibat pembebanan siklik terbilang cukup besar, walaupun nilai H_u siklik lebih besar dari H_{all} statik sehingga pembebanan siklik mungkin tidak menyebabkan kegagalan struktur fondasi tiang, kelalaian dalam memperhitungkan beban siklik dapat membahayakan dan mengurangi keamanan struktur bawah maupun atas.

Saran yang dapat penulis berikan dari hasil penelitian ini adalah:

- Dengan diadakannya penelitian ini, diharapkan pengaruh pembebanan siklik lebih diperhatikan pada daerah rawan gempa dimana dapat terjadi beban siklik satu arah maupun bolak-balik.
- Langkah yang dapat dilakukan untuk menambah ketahanan tiang terhadap beban siklik ialah menambahkan “sirip” pada dinding tiang seperti pada penelitian yang dilakukan oleh J. Peng dan rekannya (Peng et al., 2011).

DAFTAR PUSTAKA

- Broms, B. B. (1964). Lateral resistance of piles in cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(2) <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000611>
- Gunawan, R. (1991). *Pengantar teknik pondasi*. Kanisius.
- Laksmiana, T., & Prihatiningsih, A. (2020). Analisis fondasi tiang rakit yang menyatu di suatu bangunan. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(2), 361-374. <https://doi.org/https://doi.org/10.24912/jmts.v3i2.7022>

- Peng, J., Clarke, B. G., & Rouainia, M. (2011). Increasing the resistance of piles subject to cyclic lateral loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(10), 977-982. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000504](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000504)
- Puech, A., & Garnier, J. (2017). *Design of piles under cyclic loading*. John Wiley & Sons
- Reese, L. C., & Meyer, B. J. (1979). *Analysis of single piles under lateral loading*. Center For Highway Research.
- Reese, L., & Matlock, H. (1956). *Non-dimensional solutions for laterally loaded piles with soil modulus assumed proportional to depth*. Association of Drilled Shaft Contractors.
- Sardjono, H. S. (1988). *Pondasi tiang pancang jilid 1*. Sinar Wijaya.
- Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Géotechnique*, 5(4), 41-50. <https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.4.297>

