

PENGARUH PANJANG SIRIP TIANG PANCANG DALAM TANAH PASIR TERHADAP DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN

Agus Susanto*, Virli Yulia Berlianti, Qunik Wiqoyah, Anto Budi Listyawan, Furqaan Harjanto

Prodi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah

*Email: as240@ums.ac.id

Abstrak

Upaya untuk memperbesar daya dukung fondasi tiang umumnya dilakukan dengan memperbesar diameter penampang dan memperpanjang tiang. Namun hal ini dapat menyebabkan kesulitan pada saat mobilisasi. Oleh karena itu perlu adanya modifikasi tiang, salah satunya dengan penambahan sirip. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penurunan dan beban maksimum fondasi kelompok tiang bersirip dan tanpa sirip pola persegi pada tanah pasir. Penelitian dilakukan di laboratorium menggunakan *prototype* tiang baja dan media uji tanah pasir lepas dengan pembebanan vertikal dari alat *loading frame*. *Prototype* fondasi yang diuji meliputi fondasi tiang tunggal dan kelompok tiang baik tanpa sirip maupun bersirip dengan variasi panjang sirip yaitu 1/3L, 2/3L, dan L, dengan L panjang tiang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fondasi tiang tunggal tanpa sirip memiliki daya dukung maksimum sebesar 1,60 kN, sedangkan fondasi tiang tunggal bersirip L mencapai 2,20 kN sehingga mengalami peningkatan 37,50%. Fondasi kelompok tiang tanpa sirip memiliki daya dukung sebesar 3,00 kN, sedangkan kelompok tiang bersirip L meningkat menjadi 4,20 kN mengalami peningkatan 26,67%. Penurunan fondasi tiang tunggal bersirip L sebesar -16,42 mm, sedangkan fondasi kelompok tiang bersirip L sebesar -12,35 mm. Dapat disimpulkan bahwa penambahan sirip mampu meningkatkan daya dukung dan memperkecil penurunan fondasi. Semakin panjang sirip yang digunakan, semakin besar peningkatan daya dukungnya.

Kata kunci: daya dukung, penurunan, tanah pasir, tiang bersirip

Abstract

Efforts to increase the bearing capacity of pile foundations are generally carried out by enlarging the cross-sectional diameter and lengthening the pile. However, this can cause difficulties during mobilization. Therefore, it is necessary to modify the pile, one of which is by adding fins. This study aims to determine the maximum settlement and load of the foundation of a group of finned and unfinned piles in a square pattern on sandy soil. The study was conducted in a laboratory using a steel pile prototype and loose sand soil test media with vertical loading from a loading frame tool. The foundation prototypes tested included single pile foundations and pile groups, both finned and unfinned, with variations in fin length, namely 1/3L, 2/3L, and L, with L being the length of the pile. The test results showed that the single pile foundation without fins had a maximum bearing capacity of 1.60 kN, while the single pile foundation with L fins reached 2.20 kN, thus increasing by 37.50%. The foundation of the pile group without fins had a bearing capacity of 3.00 kN, while the pile group with L fins increased to 4.20 kN, experiencing an increase of 26.67%. The settlement of the single L-finned pile foundation was -16.42 mm, while the L-finned pile group foundation was -12.35 mm. It can be concluded that the addition of fins can increase the bearing capacity and reduce foundation settlement. The longer the fin used, the greater the increase in bearing capacity.

Keywords: bearing capacity, finned pile, sand, settlement

1. PENDAHULUAN

Fondasi merupakan bagian struktur yang terletak di bawah bangunan dan bersentuhan langsung dengan tanah atau bawah permukaan tanah. Fondasi memiliki peran penting sebagai bagian terendah bangunan yang berfungsi menahan beban suatu bangunan yang berada di atasnya dan mengalirkan beban keseluruhan secara horizontal maupun secara vertikal ke lapisan tanah bawahnya. Secara umum, terdapat dua jenis fondasi yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dangkal dirancang untuk menahan beban yang relatif kecil dan biasanya digunakan pada bangunan rumah satu lantai. Fondasi dalam mampu menahan beban yang lebih besar dan mentransfer beban tersebut ke tanah yang keras atau batuan pada kedalaman yang lebih dalam (Hardiyatmo, 2020).

Fondasi tiang pancang pada umumnya diaplikasikan dalam bentuk kelompok tiang (*pile group*). Konfigurasi ini merujuk pada beberapa tiang yang dipasang dalam jarak yang berdekatan secara relatif, kemudian dihubungkan secara struktural di bagian atas melalui elemen beton bertulang yang disebut *pile cap*.

Dalam perhitungan kapasitas dukung kelompok tiang, terdapat sejumlah aspek yang perlu diperhatikan secara cermat, antara lain: jumlah tiang dalam satu kelompok, jarak antar tiang, pola atau susunan penempatan tiang, serta tingkat efisiensi kerja kelompok tiang secara keseluruhan. Keempat faktor tersebut saling berkaitan dan memengaruhi performa teknis sistem fondasi dalam mendistribusikan beban ke tanah secara optimal (Priadi et al., 2016).

Penentuan fondasi yang akan digunakan perlu mempertimbangkan beberapa faktor antara lain jenis tanah, beban bangunan dan berat struktur atas, ketersediaan lahan dan waktu pelaksanaan proyek. Faktor lain yang menjadi pertimbangan adalah penurunan (*settlement*) dan daya dukung tanah. Daya dukung tanah bergantung pada jenis tanahnya (Saleh et al., 2019).

Penggunaan fondasi tiang memiliki beberapa kelemahan, di antaranya adalah berkaitan dengan mobilisasi. Apabila ingin memperbesar daya dukung fondasi dapat dilakukan dengan memperbesar diameter dan memperpanjang tiang (Muthmainnah, 2021). Hal ini menjadi salah satu faktor kelemahan yang berkaitan dengan mobilisasi karena semakin besar diameter atau panjang tiang maka akan semakin sulit untuk dilakukan mobilisasi. Kelemahan tersebut dapat dicegah dengan mengembangkan inovasi-inovasi baru yang dapat memperbesar daya dukung fondasi.

Seiring dengan perkembangan teknologi dan ilmu, desain fondasi tiang pancang semakin berkembang. Salah satu bentuk modifikasi adalah penambahan sirip baja pada fondasi tiang pancang. Trisnawati et al. (2021) meneliti model kelompok tiang bersirip dengan variasi jumlah tiang pada tanah lunak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelompok fondasi tiang bersirip memiliki kapasitas daya dukung yang lebih besar dibandingkan dengan kelompok fondasi tiang polos. Peningkatan daya dukung ini dikaitkan secara langsung dengan keberadaan penambahan sirip yang dipasang pada sisi tiang yang berfungsi menambah luas selimut tiang. Selain itu, adanya penambahan sirip mampu mengurangi penurunan yang terjadi.

Penelitian Trisnawati et al. (2021) hanya sebatas meneliti tentang variasi jumlah tiang, sedangkan pada penelitian ini digunakan variasi yang berbeda yaitu berupa variasi panjang sirip kelompok tiang pancang dengan pola persegi pada tanah pasir sehingga dapat diketahui perbandingan antara daya dukung dan penurunan yang terjadi pada kelompok tiang bersirip dengan kelompok tiang tanpa sirip. Tanah pasir yang digunakan sebagai media uji adalah tanah pasir lepas (*loose*).

Kapasitas dukung fondasi tiang pancang merupakan kemampuan tanah di bawah fondasi untuk menahan beban vertikal yang diteruskan oleh elemen tiang ke dalam lapisan tanah pendukung. Kapasitas daya dukung fondasi tiang pancang terdiri dari kapasitas ujung tiang (*end bearing piles*) dan kapasitas gesek tiang (*friction piles*). Kapasitas ujung tiang berasal dari tahanan tanah pada ujung tiang, dan dominan apabila tiang mencapai lapisan tanah keras atau batuan dasar. Dalam hal ini, daya dukung ditentukan oleh tekanan kontak antara ujung tiang dan lapisan tanah keras yang berada di bawahnya, sementara kapasitas gesek tiang timbul akibat gaya gesek antara permukaan samping tiang dengan tanah di sekelilingnya, dan biasanya mendominasi pada tiang-tiang panjang yang tidak mencapai lapisan tanah keras di dasar. Tiang-tiang jenis ini dikenal sebagai *friction piles* (Hardiyatmo, 2008).

Kapasitas dukung tiang tunggal pada tanah non kohesif (pasir atau kerikil) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Listyawan et al., 2017) :

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p \quad (1)$$

dengan:

- Q_u = daya dukung ultimit tiang tunggal (kN)
- Q_b = tahanan ujung bawah ultimit (kN)
- Q_s = tahanan gesek dinding ultimit (kN)
- W_p = berat beban tiang (kN)

Fondasi tiang pancang umumnya dipasang dalam konfigurasi kelompok (*pile group*). Hal ini dilakukan dengan cara menyusun beberapa tiang dalam jarak berdekatan dan menghubungkannya melalui suatu elemen struktural berupa *pile cap* yang berfungsi untuk menyatukan gaya-gaya dari struktur atas dan mendistribusikannya secara merata ke setiap tiang dalam kelompok. Kapasitas dukung total dari kelompok tiang tidak selalu sama dengan hasil penjumlahan langsung dari kapasitas masing-masing tiang tunggal. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antar tiang dalam kelompok yang dapat menimbulkan penurunan efisiensi akibat pengaruh bidang geser yang saling tumpang tindih dan redistribusi tegangan pada tanah pendukung (Muthmainnah, 2021).

Efisiensi tiang kelompok adalah perbandingan antara kapasitas dukung tiang kelompok dengan kapasitas dukung tiang tunggal. Nilai dari efisiensi tiang kelompok dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jarak antar tiang, jumlah, diameter, dan panjang dari suatu tiang. Efisiensi tiang kelompok (E_g) dapat didefinisikan pada persamaan berikut (Mahmud & Iskandar, 2024).

$$E_g = \frac{\text{daya dukung kelompok tiang}}{\text{total tiang} \times \text{daya dukung tiang tunggal}} \quad (2)$$

Menurut Panguriseng (2019), penurunan (*settlement*) didefinisikan apabila suatu bangunan terjadi perpindahan vertikal ke arah bawah pada permukaan tanah atau permukaan struktur. Dalam kondisi tertentu, kapasitas dukung izin tiang sangat dipengaruhi oleh batasan penurunan. Penurunan tiang terutama dipengaruhi oleh perbandingan antara daya tahan ujung dan beban yang diterima oleh tiang. Jika beban yang diterima oleh setiap tiang tidak melebihi atau setara dengan daya tahan ujung tiang, maka penurunan yang terjadi akan sangat minimal. Sebaliknya, jika beban tersebut jauh melebihi daya tahan ujung, penurunan yang terjadi akan menjadi signifikan.

Perbandingan penurunan (*ratio settlement*) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Teddy, 2013).

$$R_s = \frac{\text{Penurunan kelompok tiang}}{\text{Penurunan tiang tunggal}} \quad (3)$$

Kerapatan relatif memiliki peran yang sangat signifikan, karena secara langsung memengaruhi karakteristik tanah, seperti kekuatan geser (*shear strength*) dan kompresibilitas (*compressibility*). Kerapatan relatif (D_r) diperoleh menggunakan persamaan berikut.

$$D_r (\%) = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \times 100\% \quad (4)$$

Sedangkan nilai angka pori (e) diperoleh dari persamaan berikut (Setyo, 2009).

$$e = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (5)$$

dengan:

e = angka pori pada keadaan asli

G_s = berat jenis

γ_w = berat volume air

γ_d = berat volume kering

D_r = kerapatan relatif

e_{maks} = angka pori maksimum

e_{min} = angka pori minimum

Berdasarkan tabel nilai tipikal berat volume kering dalam Kementerian PUPR (2019), berat volume kering (γ_d) untuk jenis tanah pasir bergradasi baik dalam kondisi lepas adalah $16,5 \text{ kN/m}^3$ dan berat jenis air (γ_w) sebesar $9,81 \text{ kN/m}^3$. Nilai e_{maks} dan e_{min} sebesar 0,70 dan 0,35 pada jenis tanah pasir bergradasi baik *sub angular*.

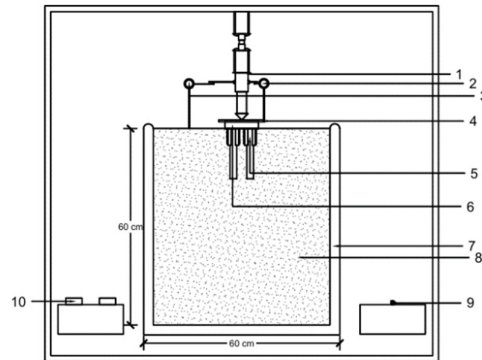
2. METODOLOGI

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta. Serangkaian tahapan penelitian disusun secara sistematis agar penelitian berjalan dengan lancar dan sesuai dengan harapan. Tahapan-tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut.

- Tahap pertama adalah mengumpulkan informasi terkait penelitian atau kajian pustaka serta melakukan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian merupakan tahapan awal dalam penelitian. Pasir yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah pasir Merapi dari tambang pasir alam Kali Gendol, Kabupaten Sleman yang sudah dikondisikan kering udara. Alat-alat yang digunakan meliputi alat pengujian berat jenis, analisis saringan, dan *loading frame*.
- Tahap kedua melakukan pengujian berat jenis tanah dan analisis saringan untuk mengetahui sifat fisis dan klasifikasi tanah. Untuk mengondisikan agar tanah pasir dalam keadaan lepas atau *loose*, maka perlu menghitung nilai angka pori tanah pasir berdasarkan berat jenis dan kerapatan relatif tanah pasir.

Selanjutnya, mengisi drum dengan tanah pasir menggunakan alat bantu berupa corong agar tanah pasir tersebut tidak mengalami tekanan atau stabil dalam penuangan.

- c) Tahap ketiga adalah memancangkan *prototype* fondasi pada drum yang berukuran diameter 60 cm dan tinggi 60 cm yang telah diisi tanah pasir. Kemudian, melakukan pengaturan *dial* yang terletak di samping fondasi untuk menentukan besarnya pengembangan tanah di samping fondasi, serta *dial* yang terletak di atas fondasi yang berfungsi untuk menentukan besarnya penurunan. Melakukan pengujian pembebanan menggunakan alat *loading frame* dan mencatat pembacaan dial penurunan dan beban maksimum. Pengujian dihentikan apabila pada *display* pembebanan mengalami penurunan selama dua kali berturut – turut. Langkah pada tahap ini dilakukan terhadap *prototype* fondasi tiang tunggal dan fondasi tiang kelompok baik bersirip atau tanpa sirip.



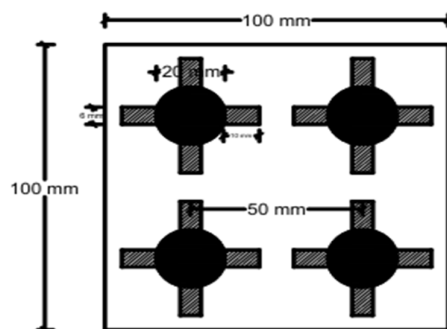
Gambar 1. Skema pengujian pembebanan menggunakan *loading frame*

Keterangan:

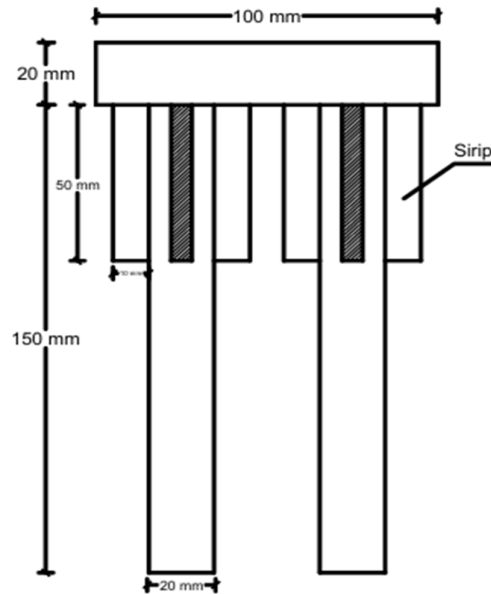
- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 = piston | 6 = <i>pile cap</i> |
| 2 = <i>dial</i> penurunan fondasi | 7 = media drum |
| 3 = <i>dial</i> penurunan tanah di samping fondasi | 8 = tanah pasir |
| 4 = plat | 9 = pompa hidrolik |
| 5 = fondasi tiang | 10 = <i>display</i> pembebanan |

Prototype fondasi tiang yang akan diuji terbuat dari baja dengan diameter tiang 20 mm, panjang tiang 150 mm, dan ukuran *pilecap* 100 mm x 100 mm dengan jarak antar pusat tiang adalah 2,5 D serta ketebalan *pile cap* 20 mm. Sirip pada *prototype* fondasi tiang memiliki ketebalan 6 mm, lebar sirip 10 mm, dan panjang sirip terdiri dari 1/3L, 2/3L, dan L, dimana L adalah panjang tiang.

Delapan *prototype* fondasi, yaitu fondasi tiang tunggal tanpa sirip, fondasi tiang tunggal bersirip dengan tiga variasi panjang sirip yaitu 1/3L, 2/3L dan L, fondasi tiang kelompok tanpa sirip, fondasi kelompok bersirip dengan tiga variasi panjang sirip yaitu yaitu 1/3L, 2/3L, dan L. Panjang tiang (L) adalah 150 mm.



Gambar 2. Tampak atas *prototype* kelompok tiang bersirip

Gambar 3. Tampak samping *prototype* kelompok tiang bersirip 1/3L

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sifat Fisis Tanah Pasir

Pengujian sifat fisis tanah pasir yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari pengujian berat jenis, dan analisis saringan, hasilnya digunakan untuk menentukan kerapatan relatif, dan klasifikasi tanah. Hasil dari pengujian sifat fisis tanah pasir dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Fisis Tanah Pasir

Jenis Pengujian	Hasil
Berat Jenis (Gs)	2,67
Lolos Saringan No.4	100 %
Lolos Saringan No.200	10 %
Koefisien Keseragaman (Cu)	6,08
Koefisien Gradasi (Cc)	1,11
Klasifikasi USCS	SW (Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus)
Berat Volume Kering	16,5 kN/m ³
Kerapatan Relatif (Dr)	32,285 %

Tanah yang tertahan saringan No. 200 sebesar 90 % dan tanah lolos saringan No. 4 sebesar 100 %. Nilai koefisien keseragaman (Cu) sebesar 6,08 dan nilai koefisien gradasi (Cc) sebesar 1,11. Berdasarkan klasifikasi tanah secara *Unified Soil Classification System (USCS)* termasuk SW yaitu pasir bergradasi baik (pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus).

Kerapatan relatif (*relative density*) menyatakan tingkat kerapatan dari tanah berbutir kasar. Berdasarkan tabel nilai tipikal berat volume kering Kementerian PUPR (2019), berat volume kering (γ_d) untuk jenis tanah pasir bergradasi baik dalam kondisi lepas adalah 16,5 kN/m³ dan berat volume air (γ_w) sebesar 9,81 kN/m³ sehingga didapatkan nilai angka pori (e) sebesar 0,587. Dalam menghitung kerapatan relatif (Dr) diperlukan nilai e_{max} dan e_{min} yang didapatkan dari Kementerian PUPR (2019). Pada jenis tanah pasir bergradasi baik nilai e_{max} sebesar 0,70 dan nilai e_{min} sebesar 0,35 sehingga didapatkan nilai kerapatan relatif (Dr) adalah sebesar 32,285 %. Dari klasifikasi tanah granuler berdasarkan kerapatan relatif (Dr) menurut Kementerian PUPR (2019) tanah dalam keadaan lepas (*loose*) memiliki nilai kerapatan relatif (Dr) sebesar 15 – 35 %, maka pada penelitian ini tanah dalam keadaan lepas (*loose*).

3.2. Hasil Pengujian Pembebanan

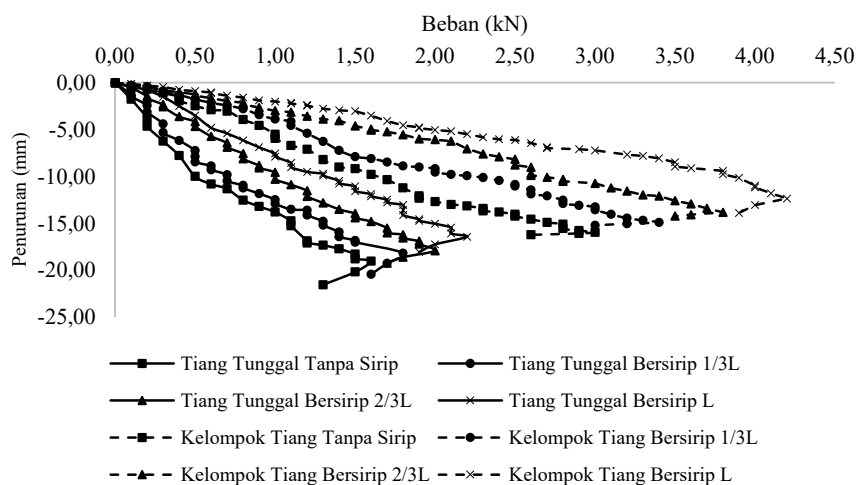
Hasil pengujian pembebanan fondasi tiang disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Nilai beban maksimum (P), penurunan, dan pengembangan

Jenis Fondasi	D (mm)	P (kN)	Persentase (%)	Penurunan (mm)	Pengembangan (mm)
Tiang Tunggal Tanpa Sirip	20	1,60	0,00	-19,02	3,00
Tiang Tunggal Bersirip 1/3L		1,80	12,50	-18,16	4,80
Tiang Tunggal Bersirip 2/3L		2,00	25,00	-17,90	7,30
Tiang Tunggal Bersirip L		2,20	37,50	-16,42	9,40
Kelompok Tiang Tanpa Sirip		3,00	0,00	-15,95	11,60
Kelompok Tiang Bersirip 1/3L		3,40	13,33	-14,89	14,60
Kelompok Tiang Bersirip 2/3L		3,80	26,67	-13,81	16,80
Kelompok Tiang Bersirip L		4,20	40,00	-12,35	18,50

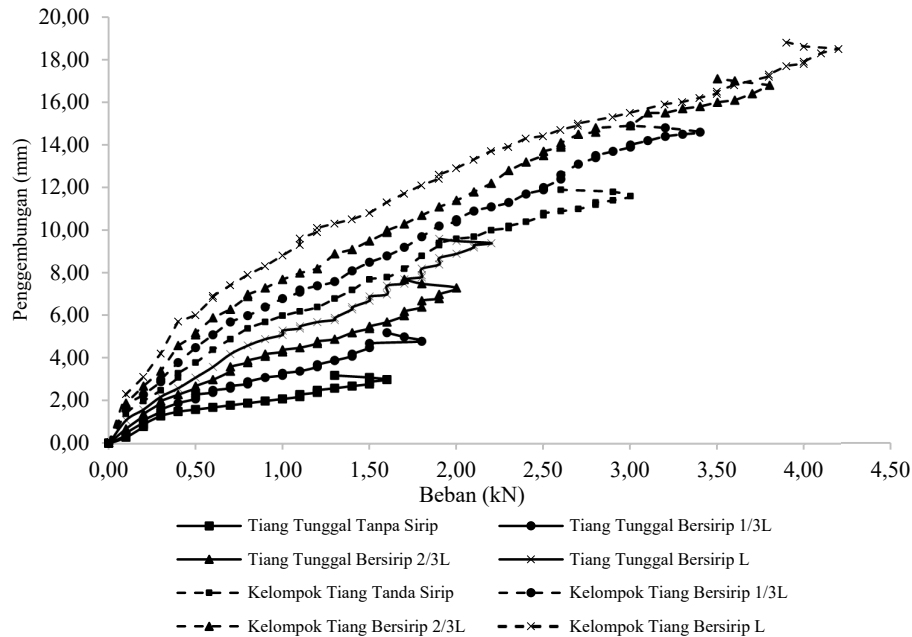
Pada fondasi tiang tunggal tanpa sirip diperoleh beban maksimum sebesar 1,60 kN, penurunan sebesar -19,02 mm, dan pengembangan sebesar 3,00 mm. Jika fondasi tiang tunggal diberikan penambahan sirip 1/3L diperoleh beban maksimum meningkat menjadi 1,80 kN, penurunan berkurang menjadi -18,16 mm, dan pengembangan meningkat menjadi 4,80 mm. Pada fondasi kelompok tiang tanpa sirip, beban maksimum yang mampu ditahan sebesar 3,00 kN, dengan penurunan -15,95 mm dan pengembangan 11,60 mm. Setelah diberikan penambahan sirip 1/3L, beban maksimum meningkat menjadi 3,40 kN, penurunan berkurang menjadi -14,89 mm, dan pengembangan meningkat menjadi 14,60 mm. Adanya penambahan sirip terbukti meningkatkan kapasitas daya dukung fondasi dan pengembangannya yang disebabkan oleh bertambahnya luas permukaan selimut tiang, serta memperkecil penurunan yang terjadi.

Pada fondasi kelompok tiang tanpa sirip didapatkan nilai beban maksimum sebesar 3,00 kN, nilai penurunan sebesar -15,95 mm, dan nilai pengembangan sebesar 11,60 mm. Pada fondasi kelompok tiang bersirip 1/3L nilai beban maksimum yang diperoleh sebesar 3,40 kN, nilai penurunan sebesar -14,89 mm dengan penurunan 14,60 mm. Pada fondasi kelompok tiang 2/3L didapatkan beban maksimum yaitu 3,80 kN, penurunan -13,81 mm, dan pengembangan 16,80 mm. Sedangkan pada fondasi kelompok tiang bersirip L diperoleh nilai beban maksimum sebesar 4,20 kN, dengan nilai penurunan yaitu -12,35 mm, serta pengembangan sebesar 18,50 mm. Hal ini menunjukkan bahwa fondasi kelompok tiang L memiliki nilai beban maksimum paling besar dan nilai penurunan paling kecil serta nilai pengembangan juga semakin besar. Hubungan antara beban dan penurunan semua variasi tiang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hubungan antara beban dan penurunan semua variasi tiang

Hubungan antara beban dan pengembangan semua variasi tiang disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan antara beban dan pengembangan semua variasi tiang

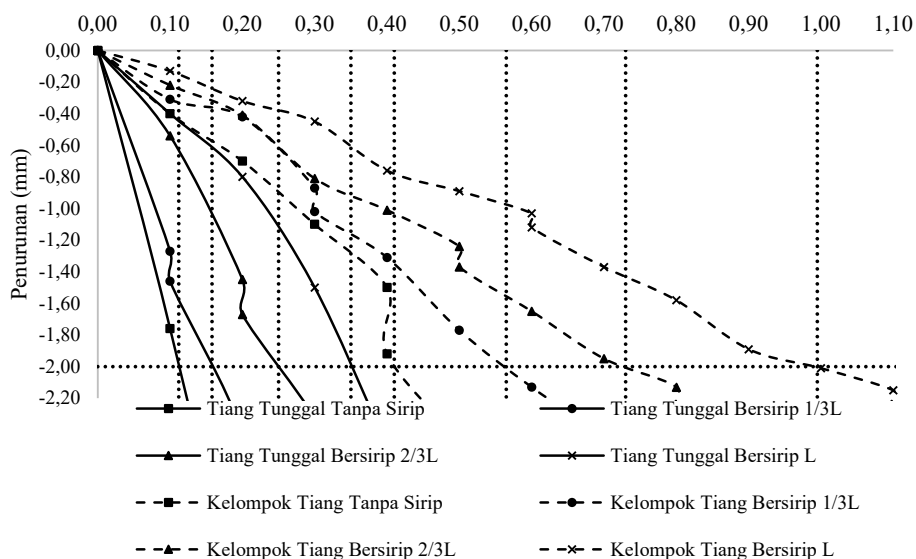
Daya dukung ultimit tiang (Q_u) pada tanah pasir berasal dari gabungan antara tahanan ujung (Q_b) dan tahanan gesek selimut tiang (Q_s). Penambahan sirip 1/3L, 2/3L, dan L baik pada fondasi tiang tunggal maupun fondasi kelompok tiang dapat meningkatkan beban maksimum yang dapat ditahan dan mengurangi penurunan karena penambahan sirip menyebabkan luas selimut tiang meningkat sehingga tahanan gesek selimut tiangnya (Q_s) meningkat pula.

Peningkatan nilai pengembangan pada pengujian fondasi tiang bersirip disebabkan oleh terjadinya keruntuhan geser umum (*general shear failure*) pada tanah di sekitar tiang. Kegagalan geser tersebut menyebabkan massa tanah di sekitar tiang terdorong keluar dan ke atas akibat berkurangnya kapasitas menahan beban pada bidang geser. Penambahan panjang sirip memperluas bidang kontak antara tiang dan tanah, sehingga memperbesar zona keruntuhan geser yang terbentuk. Semakin panjang sirip yang digunakan, semakin besar tanah yang terdorong ke atas, sehingga nilai pengembangan yang terjadi menjadi lebih besar.

Adanya penambahan panjang sirip dapat memperbesar luas selimut tiang (A_s). Semakin besar luas selimut tiang maka semakin besar tahanan gesek selimutnya, dan semakin tinggi nilai daya dukung ultimitnya. Hal ini ditunjukkan pada persamaan (1) kapasitas dukung tiang tunggal pada tanah non kohesif (pasir atau kerikil).

3.3. Persentase Beban Maksimum

Berdasarkan Tabel 2. dapat diketahui bahwa pada fondasi tiang tunggal bersirip 1/3L, 2/3L, dan L memiliki kenaikan persentase dalam menahan beban sebesar 12,50 %, 25,00 %, dan 37,50 % dibandingkan dengan fondasi tiang tunggal tanpa sirip. Sedangkan pada fondasi kelompok tiang bersirip 1/3L, 2/3L, dan L menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu mempunyai kenaikan persentase dalam menahan beban sebesar 13,33 %, 26,67 %, dan 40,00 % dibandingkan dengan fondasi kelompok tiang. Hal ini disebabkan adanya perbedaan panjang sirip yang mengakibatkan nilai tahanan gesek selimut fondasi tiang semakin bertambah besar pula, sehingga beban yang mampu ditahan oleh fondasi juga semakin besar.



Gambar 6. Grafik kondisi beban pada penurunan yang diizinkan

3.4. Nilai Beban pada Kondisi Penurunan yang Diizinkan

Menurut Reese & Wright (1997) dalam Muthmainnah (2021), perhitungan penurunan fondasi yang diizinkan untuk mengetahui nilai beban pada kondisi penurunan yang sama adalah menggunakan acuan perbandingan penurunan yang aman yaitu $S_{total} \leq S_{izin}$ dengan S_{izin} adalah 10% diameter. Diameter tiang yang digunakan pada penelitian ini adalah 20 mm sehingga penurunan yang diizinkan adalah sebesar 2,00 mm.

Pada saat kondisi penurunan 2,00 mm nilai beban yang mampu ditahan baik fondasi tiang tunggal bersirip maupun fondasi kelompok tiang bersirip mengalami kenaikan. Berdasarkan Gambar 6. beban terbesar pada fondasi tiang tunggal yang mampu ditahan terjadi pada fondasi tiang tunggal bersirip L yaitu dengan beban sebesar 0,35 kN sedangkan beban terbesar yang mampu ditahan oleh fondasi kelompok tiang juga terjadi pada fondasi kelompok tiang bersirip L yaitu sebesar 1,00 kN. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa fondasi bersirip L memiliki nilai beban maksimum terbesar dibanding fondasi tiang tunggal dan kelompok tiang lainnya. Adanya peningkatan nilai beban, hal ini membuktikan bahwa dengan adanya sirip mampu meningkatkan daya dukung ultimit fondasi.

3.5. Efisiensi Kelompok Tiang dan Ratio Settlement

Hasil hitungan nilai efisiensi kelompok tiang dan *ratio settlement* disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Nilai efisiensi kelompok tiang dan *ratio settlement*

Jenis Fondasi	Efisiensi Kelompok Tiang	Ratio Settlement
Tanpa Sirip	0,469	0,839
Bersirip 1/3L	0,531	0,783
Bersirip 2/3L	0,594	0,726
Bersirip L	0,656	0,649

Berdasarkan Tabel 3, nilai efisiensi kelompok tiang paling besar terjadi pada fondasi kelompok tiang bersirip L dengan nilai efisiensi kelompok tiang sebesar 0,656. Semakin panjang sirip yang digunakan, maka semakin besar pula efisiensi kelompok tiangnya. Efisiensi kelompok tiang terjadi dikarenakan adanya *overlapping failure zone* antar tiang. Pada fondasi kelompok tiang tanpa sirip, zona keruntuhan tanah yang terbentuk di sekitar setiap tiang cenderung saling bertumpang tindih. Kondisi ini menyebabkan sebagian volume tanah bekerja secara ganda untuk lebih dari satu tiang, sehingga kontribusi daya dukung masing-masing tiang terhadap kapasitas total kelompok tidak optimal. Peningkatan nilai efisiensi kelompok tiang yang terjadi pada fondasi bersirip mendekati angka 1 dikarenakan fondasi tiang berperilaku seperti satu kesatuan

fondasi dangkal yang menyebabkan tidak adanya *overlapping failure zone*, namun membentuk satu kesatuan *failure zone*.

Pada fondasi kelompok tiang bersirip L memiliki nilai *ratio settlement* paling kecil dibandingkan dengan fondasi lainnya. Semakin panjang sirip yang digunakan pada fondasi, maka semakin kecil nilai *ratio settlement* yang terjadi. Hal ini disebabkan oleh adanya penambahan sirip mengakibatkan luas selimut pada tiang semakin besar yang menyebabkan tahanan gesek selimut tiang semakin besar. Hal ini membuktikan bahwa adanya sirip dapat mengurangi penurunan (*settlement*) pada fondasi.

4. KESIMPULAN

Semakin panjang sirip yang ditambahkan pada fondasi tiang maka nilai kuat dukung atau beban maksimum yang dapat ditahan akan semakin besar, sementara nilai penurunan (*settlement*)-nya semakin kecil. Hal ini disebabkan semakin panjang sirip, maka luas selimut tiang akan semakin bertambah, tahanan geseknya semakin meningkat. Kelompok tiang tanpa sirip memiliki daya dukung sebesar 3,00 kN, sedangkan kelompok tiang bersirip L meningkat menjadi 4,20 kN atau mengalami peningkatan 26,67%. *Settlement* yang terjadi pada kelompok tiang tanpa sirip adalah sebesar -15,95 mm, sedangkan pada fondasi kelompok tiang bersirip L sebesar -12,35 mm, mengalami penurunan sebesar 22,57%. Semakin panjang sirip yang dipasang pada fondasi tiang maka nilai *ratio settlement* akan semakin kecil. Nilai *ratio settlement* yang semakin kecil menunjukkan bahwa fondasi memiliki kinerja yang semakin baik dalam mengurangi penurunan pada fondasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Hardiyatmo, H. C., 2008, Teknik Fondasi II, Edisi ke 4, Gramedia Pustaka Utama.
- Hardiyatmo, H. C., 2020, Analisis dan Perancangan Fondasi, Gadjah Mada University Press.
- Kementerian PUPR., 2019, Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik, PUPR.
- Listyawan, A. B., Renaningtyas, Wiqoyah, Q., & Susanto, A., 2017, Mekanika Tanah dan Rekayasa Pondasi.
- Mahmud, S., & Iskandar, A., 2024, Hubungan Efisiensi Kapasitas Dukung Terhadap Jarak Antar Tiang Pada Kelompok Tiang. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(2), 583–588.
- Muthmainnah, M., 2021, Analisis Kapasitas Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Pancang Dengan Variasi Dimensi. *Skripsi Teknik Universitas Islam Indonesia*.
- Panguriseng, D., & Sariman, S., 2019, Rekayasa Pondasi Dangkal (Issue January).
- Priadi, E., Herwin, & Aprianto., 2016, Kajian Efisiensi Pada Kelompok Tiang Dengan Konfigurasi 2 X 2. *Jurnal Untan*, 1–10.
- Saleh, A., & Anggraini, M., 2019, Metoda Perbaikan Tanah Lunak Dengan Penambahan Pasir. *Prosiding Seminar Nasional Pakar*, 2–5. <https://doi.org/10.25105/pakar.v0i0.4141>
- Setyo, M. A., 2009, Rekayasa Geoteknik Mekanika Tanah. In Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Teddy, L., 2013, Prediksi Settlement Pondasi Tiang Cara Hand Method vs Pile Driving Analysis (PDA) di Kota Palembang, February. <https://doi.org/10.36448/jaubl.v3i2>
- Trisnawati, L., Fatnanta, F., & Yusa, M., 2021, Perilaku Daya Dukung Grup Pondasi Tiang Bersirip Pada Tanah Lunak, *Sainstek (e-Journal)*, 9(1), 61–68. <https://doi.org/10.35583/js.v9i1.139>