

ANALISIS DAYA DUKUNG AKSIAL FONDASI TIANG PIPA PVC DENGAN PENGARUH UDARA TERPERANGKAP DI TANAH LUNAK BERDASARKAN MODEL SKALA LABORATORIUM

Susy Srihandayani¹, Abdul Hakam^{2*}, Mas Mera², Febrin Anas Ismail²

¹⁾ Program Doctor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
Limau Manis, Pauh, Padang Sumatera Barat 25175

²⁾ Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas
Limau Manis, Pauh, Padang Sumatera Barat 25175,

^{*})email: abdulhakam2008@gmail.com

Diterima : 26 Agustus 2024
Direvisi : 11 September 2024

Disetujui : 24 September 2024
Diterbitkan : 30 November 2024

Abstract: Previous research has evaluated PVC pipe pile foundations as a solution for foundation issues in soft soil. However, an important element that has not been deeply explored is the contribution of trapped air inside the PVC pipes to the foundation's bearing capacity. This trapped air has the potential to provide a significant buoyancy effect, which can reduce the effective load on the pile and increase the total bearing capacity. This study aims to measure and analyse the impact of trapped air on the bearing capacity of PVC pipe piles. The primary focus of this research is to understand how variations in PVC pipe diameter affect the contribution of trapped air and its implications for foundation stability. The study utilizes a series of physical experiments with specially designed setups to measure bearing capacity both with and without the presence of trapped air. PVC pipes with varying diameters (2, 2.5, 3, and 4 inches) and a length of 30 cm were used to explore the effect of size changes on the contribution of trapped air. Experimental results indicate that trapped air inside the PVC pipes significantly contributes to the increase in foundation-bearing capacity. Increases in a pipe diameter of 25%, 50%, and 100% respectively lead to total bearing capacity increases of 31%, 71%, and 146%, end-bearing capacity increases of 39.1%, 89.1%, and 131.3%, and skin friction increases of 21.7%, 52.2%, and 64.3%. Additionally, the increase in bearing capacity due to trapped air was 33.3%, 72.2%, and 222.2%, which directly impacts the enhancement of foundation stability in soft soil. These findings demonstrate that trapped air inside PVC pipes not only reduces the effective load but also significantly enhances the foundation's bearing capacity. This opens new opportunities for using PVC material as pile foundations, particularly in soft soil conditions where greater bearing capacity is required.

Keywords: Shallow foundation, foundation bearing capacity, pipe diameter, PVC pipe pile, trapped air, soft soil

Abstrak: Penelitian sebelumnya telah mengevaluasi fondasi tiang pipa PVC sebagai solusi untuk masalah fondasi di tanah lunak. Namun, masih ada elemen penting yang belum dieksplorasi secara mendalam, yaitu kontribusi udara terperangkap di dalam pipa PVC terhadap daya dukung fondasi. Udara terperangkap ini berpotensi memberikan efek apung yang signifikan, yang dapat mengurangi beban efektif pada tiang dan meningkatkan kapasitas dukung total. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan menganalisis pengaruh udara terperangkap terhadap daya dukung fondasi tiang PVC. Fokus utama penelitian ini adalah memahami bagaimana variasi diameter pipa PVC mempengaruhi kontribusi udara terperangkap dan implikasinya terhadap stabilitas fondasi. Penelitian ini menggunakan serangkaian eksperimen fisik dengan setup yang dirancang khusus untuk mengukur daya dukung dengan dan tanpa adanya udara terperangkap. Variasi diameter (2, 2.5, 3 dan 4 inci) pipa PVC panjang 30 cm digunakan untuk mengeksplorasi efek perubahan ukuran terhadap kontribusi udara terperangkap. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa udara terperangkap di dalam pipa PVC memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan daya dukung fondasi. Kenaikan diameter pipa masing-masing 25%, 50% dan 100% menyebabkan kenaikan daya dukung total berturut turut 31%, 71% dan 146%, kenaikan daya dukung ujung tiang pipa berturut turut 39.1%, 89.1% dan 131.3%, kenaikan daya dukung *skin friction* berturut turut 21.7%, 52.2% dan 64.3%. Selain itu kenaikan daya dukung udara terperangkap berturut turut 33.3%, 72.2% dan 222.2%, yang secara langsung berdampak pada peningkatan stabilitas fondasi di tanah lunak. Temuan ini menunjukkan bahwa udara terperangkap di dalam pipa PVC tidak hanya mengurangi beban efektif, tetapi juga secara signifikan meningkatkan daya dukung fondasi. Hal ini membuka peluang baru untuk penggunaan material

PVC sebagai fondasi tiang, khususnya dalam kondisi tanah yang lunak dan membutuhkan peningkatan daya dukung yang lebih besar.

Kata kunci : fondasi dangkal, daya dukung fondasi, diameter pipa, tiang pipa PVC, udara terperangkap, tanah lunak

1. PENDAHULUAN

Fondasi tiang di tanah lunak sering menghadapi tantangan besar, terutama dalam hal menjaga stabilitas struktur dan mencegah penurunan berlebihan [1], [2], [3]

Penggunaan material PVC sebagai fondasi tiang telah dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya, dengan fokus pada evaluasi daya dukung melalui *skin friction* dan *end bearing*. Namun, aspek yang belum mendapatkan perhatian penuh adalah bagaimana udara yang terperangkap di dalam pipa PVC dapat memberikan kontribusi tambahan terhadap daya dukung fondasi [4]

Pengujian dilakukan pada tanah lunak dengan sifat-sifat fisik dan mekanis tertentu yang memengaruhi performa fondasi tiang pipa PVC. Tanah lunak yang digunakan memiliki konsistensi tinggi, dengan kadar air yang signifikan dan nilai kepadatan rendah [5], [6], [7]. Tanah ini juga menunjukkan nilai kohesi yang rendah dan sudut geser dalam yang kecil, yang mengindikasikan kemampuan rendah tanah untuk menahan beban vertikal tanpa mengalami penurunan yang signifikan. Sifat-sifat tanah lunak yang digunakan dalam pengujian berperan penting dalam menentukan daya dukung fondasi [8], [9]. Kelembaban tinggi dan kohesi rendah membuat tanah cenderung mengalami penurunan (*settlement*) yang lebih besar saat diberikan beban [10]. Ini berarti bahwa daya dukung yang diukur dari fondasi tiang pipa PVC sebagian besar dipengaruhi oleh sifat deformasi tanah tersebut, di mana tanah yang lunak cenderung memberikan resistensi yang lebih rendah terhadap beban aksial [11]

Penelitian ini bertujuan untuk memahami peran udara terperangkap dalam meningkatkan daya dukung fondasi tiang PVC pada tanah lunak. Dengan mengeksplorasi variasi diameter pipa, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan bagaimana perubahan ukuran pipa mempengaruhi kontribusi udara terperangkap dan stabilitas keseluruhan fondasi.

Tanah lunak, seperti yang ditemukan di daerah pesisir, rawa, atau delta sungai, sering kali terdiri dari lempung lunak atau tanah organik dengan karakteristik daya dukung yang sangat rendah dan kompresibilitas tinggi [12]. Tanah jenis ini cenderung mengalami penurunan yang signifikan ketika dikenai beban, terutama jika struktur yang didukung memiliki berat yang cukup besar [13]. Tanah lunak dapat mengalami penurunan selama bertahun-tahun setelah struktur selesai dibangun, mengakibatkan kerusakan pada bangunan di atasnya [14], [15], [16]. Hal ini menuntut pengembangan

teknik fondasi yang dapat mengatasi masalah ini, termasuk fondasi tiang yang mampu menembus lapisan tanah lunak hingga mencapai lapisan tanah yang lebih stabil.

Fondasi tiang telah lama digunakan sebagai solusi untuk mengatasi tantangan yang dihadirkan oleh tanah lunak. Menurut, fondasi tiang memberikan dukungan melalui kombinasi daya dukung ujung (*end bearing*) dan gesekan sisi (*skin friction*) [17], [18], [19]. Pada tanah lunak, gesekan sisi sering kali memberikan kontribusi yang lebih kecil dibandingkan dengan daya dukung ujung karena rendahnya kekuatan geser tanah. Namun, dengan desain yang tepat, seperti penggunaan tiang panjang yang menembus ke lapisan tanah yang lebih keras, fondasi tiang dapat secara signifikan meningkatkan stabilitas struktur [20], [21]

Penggunaan material alternatif seperti pipa PVC dalam konstruksi fondasi tiang adalah bidang yang relatif baru dalam penelitian geoteknik. Pipa PVC dikenal karena kekuatannya yang cukup baik dan berat yang ringan, serta kemudahan pemasangannya. Material PVC dapat digunakan sebagai pengganti material konvensional seperti baja atau beton, terutama untuk aplikasi ringan hingga sedang [22]. Namun, penelitian tentang penggunaan pipa PVC sebagai fondasi tiang masih terbatas, terutama dalam konteks tanah lunak. Oleh karena itu, ada kebutuhan yang mendesak untuk memahami bagaimana pipa PVC berperilaku di bawah beban, terutama dalam hal kontribusi udara terperangkap di dalam pipa terhadap daya dukung keseluruhan [11], [23]

Udara terperangkap dalam struktur fondasi, seperti dalam tiang pipa PVC yang tertutup, dapat menghasilkan efek apung yang mengurangi beban efektif pada fondasi. Menurut teori Archimedes, gaya apung yang dihasilkan oleh udara terperangkap ini dapat memberikan resistensi tambahan terhadap beban aksial, yang pada gilirannya dapat meningkatkan daya dukung fondasi. Beberapa studi, seperti yang dilakukan oleh [11] telah menunjukkan bahwa efek apung ini dapat mempengaruhi stabilitas dan daya dukung struktur, namun penelitian khusus tentang kontribusi udara terperangkap dalam konteks fondasi tiang pipa PVC pada tanah lunak masih sangat terbatas.

Meskipun ada penelitian yang luas tentang fondasi tiang dan penggunaan material PVC, belum ada studi yang secara khusus mengkaji pengaruh udara terperangkap dalam pipa PVC sebagai elemen yang meningkatkan daya dukung pada tanah lunak. Oleh

karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan menganalisis bagaimana variasi diameter pipa PVC dan keberadaan udara terperangkap dapat mempengaruhi stabilitas dan kapasitas dukung fondasi di tanah lunak. Dengan mengintegrasikan hasil-hasil dari literatur terdahulu dan fokus penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti dalam pengembangan metode fondasi tiang yang lebih efektif dan efisien, khususnya di area dengan kondisi tanah lunak [23]

2. METODE PENELITIAN

Sebelum melakukan penelitian tentang fondasi di tanah lunak, penting terlebih dahulu melakukan uji properti pada sampel tanah. Uji properti tanah ini merupakan kumpulan tes yang bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik dan mekanik dari tanah. Beberapa jenis uji properti tanah yang sering dilakukan meliputi uji kadar air, berat jenis, dan berat volume tanah. Selain itu, terdapat Uji tekan bebas (UCST) dan uji batas konsistensi, yang semuanya berperan penting dalam menentukan karakteristik tanah yang relevan untuk desain fondasi.

Sampel tanah lunak yang terlihat seperti pada **Gambar 1** diambil dari lapangan dan kemudian di ayak dengan menggunakan ayakan No.100 untuk memisahkan butiran halus.



Gambar 1. Proses persiapan sampel tanah lunak

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental yang dirancang untuk mengevaluasi daya dukung fondasi tiang pipa PVC di tanah lunak, dengan fokus khusus pada kontribusi udara terperangkap di dalam pipa. Desain eksperimen melibatkan pengujian beberapa *setup* dengan variasi diameter pipa PVC, yaitu 2" (6 cm), 2.5" (7.6 cm), 3" (8.9 cm), dan 4" (11.4 cm) dan panjang tiang pipa 30 cm, seperti yang terlihat pada **Gambar 2**. Meskipun penamaan diameter menggunakan inci, untuk keperluan perhitungan analisis daya dukung, satuan yang digunakan adalah sentimeter

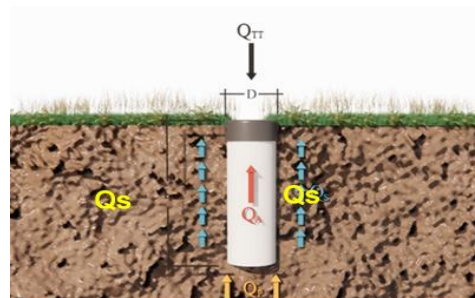
(cm). Tiang pipa ditanam pada tanah lunak untuk mengamati perilaku daya dukung dari masing-masing konfigurasi [23].



Gambar 2. Variasi Diameter Pipa

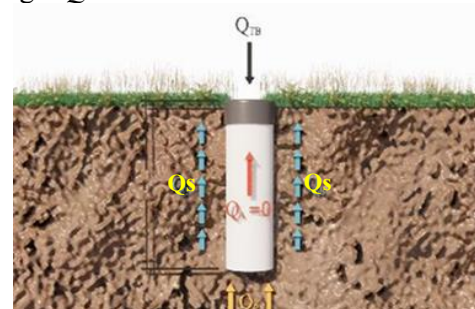
Pada tiang pipa dengan diameter dan panjang yang sama dibagi menjadi dua belas *setup* yaitu:

1. *Setup 1 – 4* (diameter 2", 2.5", 3" dan 4") terlihat pada tampak perspektif **Gambar 3**, merupakan tiang pipa PVC dengan ujung atas pipa tertutup rapat (menggunakan penutup pipa yang telah diberi silikon) hingga hampa udara dan air. Hasil dari data pengujian beban terhadap penurunan di dapatkan daya dukung *Ultimate* disimbolkan dengan Q_{TT} .



Gambar 3. Perilaku tiang pipa (*setup* 1-4)

2. *Setup 5-8* **Gambar 4**, pada bagian tutup pipa setiap diameter tiang pipa PVC dimodifikasi dengan memberi lubang sebesar 0.5 cm sebanyak 4 lubang. Daya dukung maksimu m yang dihasilkan di simbolkan dengan Q_{TB} .

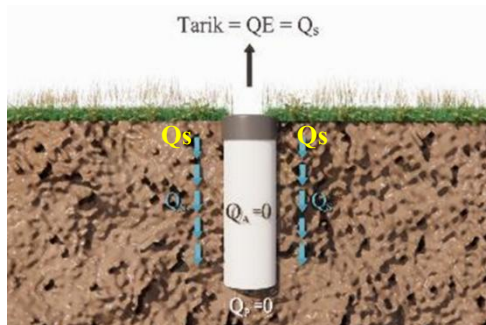


Gambar 4. Perilaku tiang pipa (*setup* 5-8)

3. Tiang pipa *Setup 5 – 8* yang telah terpancang,

dilanjutkan dengan *Setup* 9 – 12 seperti terlihat pada

- 4.
5. **Gambar 5** yaitu masing masing tiang pipa ditarik keatas (*uplift*) hingga ujung bawah tiang pipa rata dengan permukaan tanah.



Gambar 5. Perilaku tiang pipa (*setup* 9-12)

Daya dukung ultimate yang dihasilkan disimbolkan dengan Q_E atau Q_S .

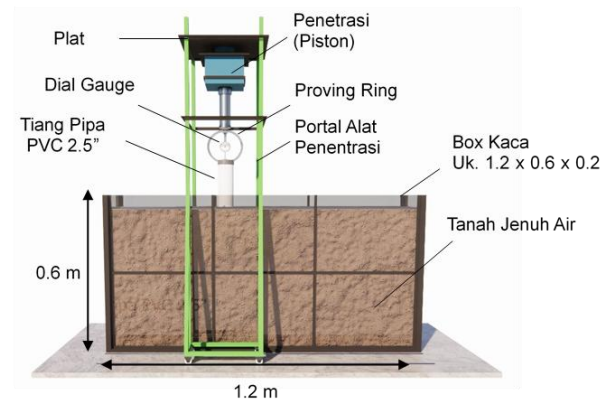
Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan cara menanam pipa PVC pada tanah lunak dan mengukur daya dukung yang dihasilkan menggunakan alat ukur yang tepat. Setup eksperimen dibagi menjadi dua kelompok: satu kelompok dengan pipa PVC yang memiliki udara terperangkap, dan satu kelompok tanpa udara terperangkap. Pengukuran dilakukan untuk setiap variasi diameter, dan data yang dihasilkan dianalisis untuk menentukan pengaruh udara terperangkap terhadap daya dukung [25]. Model peralatan pengujian seperti pada **Gambar 6** untuk setiap *setup* atau variasi diameter pipa PVC.

Axial loading test dilakukan secara eksperimental di laboratorium, boks kaca diisi tanah lunak, dan dipadatkan selama 30 hari. Pengujian hanya fokus pada uji axial (tekan dan tarik), untuk melihat apakah material pipa PVC yang di adopsi sebagai material baru untuk fondasi pipa pada tanah lunak memiliki daya dukung. Sehingga penelitian ini mengabaikan ukuran boks kaca yang digunakan.

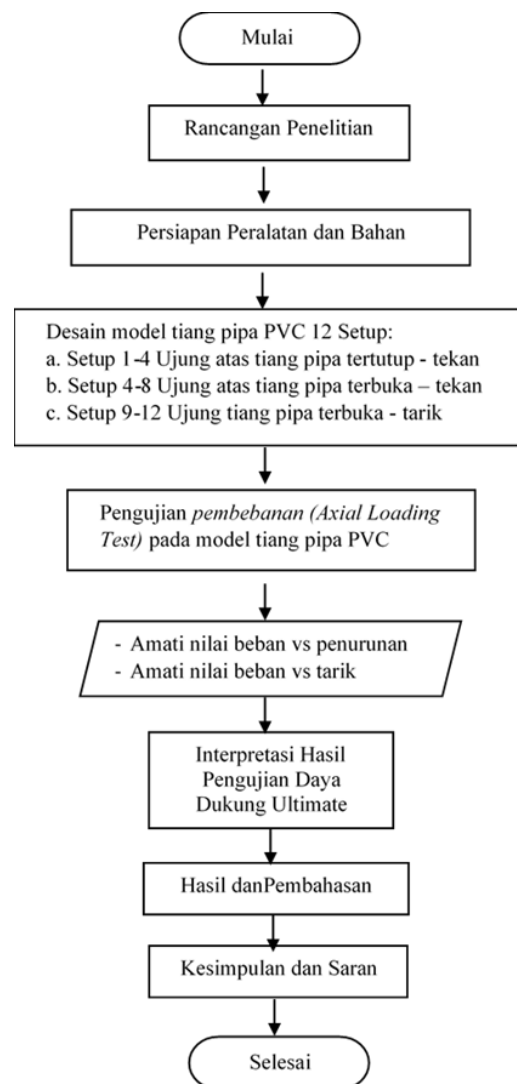
Prosedur pengujian dan pengambilan data:

1. Pemancangan Tiang
 - a. Berawal dari menyiapkan tiang pipa dengan diameter yang berbeda (2", 2.5", 3" dan 4") untuk di uji, dan memastikan ujung bawah tiang terbuka dan ujung atas tertutup rapat menggunakan tutup pipa hampa udara.
 - b. Memancang tiang menggunakan *CBR Portable Field Kit* modifikasi dilengkapi *dial gauge* dan *proofing ring*, menekan hingga kedalaman 30 cm atau hingga kepala tiang sejajar dengan permukaan tanah.



Gambar 6. Axial loading test tiang pipa PVC

Untuk lebih detail tahapan penelitian yang dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah Program Studi Teknik Sipil Universitas Andalas dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Flowchart Penelitian

Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengujian dianalisis menggunakan beberapa metode interpretasi beban terhadap penurunan menggunakan metode *Mazurkiewicz*. [26], [27], [28] Untuk menentukan kontribusi udara terperangkap terhadap daya dukung fondasi analisis melibatkan perbandingan antara daya dukung pipa PVC dengan dan tanpa udara terperangkap (*setup 1-12*) Selain itu, data juga dianalisis untuk melihat bagaimana variasi diameter mempengaruhi kontribusi udara terperangkap dan bagaimana ini berdampak pada keseluruhan stabilitas fondasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tanah lunak yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan beberapa karakteristik penting yang mempengaruhi perilaku fondasi tiang pipa PVC. Tanah yang digunakan memiliki beberapa sifat yang menonjol seperti terlihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Propertis tanah lunak

No	Jenis Pengujian	Parameter	Nilai	Satuan
1	Kadar Air	w	98.8	%
2	Berat Volume Tanah	γ	0.016	N/cm ³
3	Berat Jenis	Gs	2.5	-
4	UCST	qu	1.981	N/cm ²
5	Kohesi	c	0.991	N/cm ²
6	Liquid Limit	LL	52.9	%
7	Plastic Limit	PL	31.06	%
	Jenis Tanah (Klasifikasi Tanah USCS)	MH atau OH Lanau tak organik dengan dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung		

Sumber: Hasil Penelitian, 2023

Dalam pembahasan, hasil pengujian dikorelasikan dengan propertis tanah untuk menentukan bagaimana berbagai faktor, seperti kohesi dan batas plastisitas, mempengaruhi perilaku tiang. Tanah dengan *Liquid Limit* (LL) 52.9% dan *Plastic Limit* (PL) 31.06% memiliki plastisitas yang tinggi, yang dapat menyebabkan perubahan perilaku tiang terutama selama pengujian beban tekan dan tarik.

Data yang diperoleh dari eksperimen pada **Tabel 2**, menunjukkan bahwa pipa PVC dengan ujung tiang tertutup -tekan (*setup 1-4*) (Q_{TT}) memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibandingkan dengan pipa tanpa udara terperangkap/ *setup 5-8* (Q_{TB}). Pengujian tiang pipa tarik

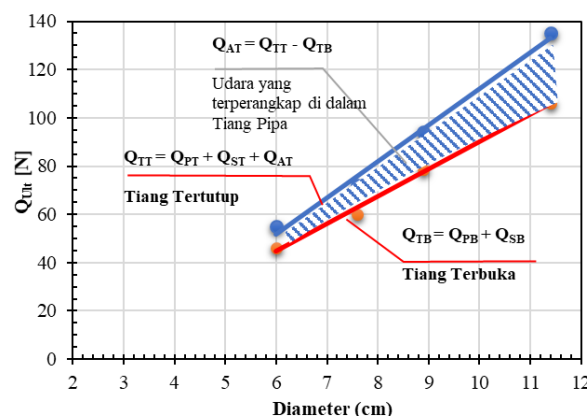
(Q_E) juga dilakukan untuk menentukan kemampuan daya dukung sisi pada tiang pipa. Pengujian ini dilakukan pada tiang pipa *setup 5-8* yang telah terpancang pada tanah lunak. Besar daya dukung tiang pipa tarik (*uplift*) ($Q_E = Q_s$) terhadap variasi diameter tiang. Hasil pengujian *setup 1* hingga *setup 12* terlihat pada **Tabel 2** berikut ini:

Tabel 2. Daya dukung ultimate tiang pipa

Diameter Pipa	Tiang	Daya Dukung Ultimate Tiang Pipa [N]		
Inci	cm	Q_{TT}	Q_{TB}	Q_E
2	6	55	46	23
2.5	7.6	72	60	28
3	8.9	94	78.5	35
4	11.4	135	106	41

Sumber: Hasil Penelitian, 2023

Untuk mengetahui apakah ada pengaruh udara yang terperangkap di dalam tiang pipa, dapat dijelaskan melalui **Gambar 8**. Error! Reference source not found.



Gambar 8. Daya dukung dari udara (Q_{AT}) yang terperangkap didalam pipa

Perbedaan daya dukung antara tiang pipa tertutup Q_{TT} dengan tiang pipa terbuka Q_{TB} mewakili kontribusi dari udara yang terperangkap di dalam tiang pipa tertutup. Udara terperangkap meningkatkan daya dukung tiang tertutup di bandingkan dengan tiang terbuka yang dapat dilihat dari kenaikan signifikan pada garis biru di atas garis merah. Selain itu grafik menunjukkan bahwa semakin besar diameter tiang pipa, semakin tinggi daya dukung total, tetapi peningkatan daya dukung lebih tinggi pada tiang pipa Q_{TT} karena kontribusi udara terperangkap. Hubungan ini menunjukkan peningkatan efisiensi daya dukung seiring dengan meningkatnya diameter tiang. Untuk menentukan nilai Q_p dan Q_{AT} dapat dianalisis dari persamaan (1) dan (2) sebagai berikut :

$$Q_{TT} = Q_p + Q_s + Q_{AT} \quad (1)$$

$$Q_{TB} = Q_p + Q_s \quad (2)$$

Sehingga :

$$Q_{AT} = Q_{TT} - Q_{TB} \quad (3)$$

$$Q_p = Q_{TT} - Q_E - Q_{AT} \quad (4)$$

Dimana :

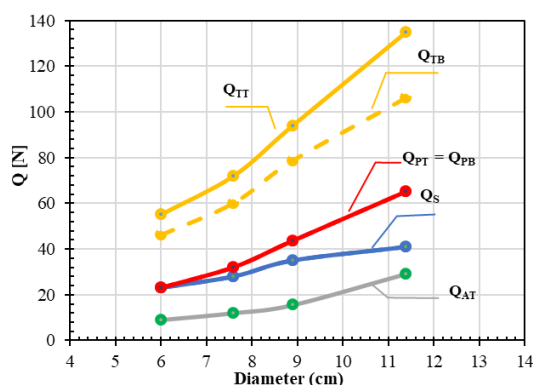
Q_{TT} = daya dukung *ultimate* tiang pipa tekan-tutup / setup 1-4, (N)

Q_{TB} = daya dukung *ultimate* tiang pipa tekan-buka / setup 5-8 (N)

Q_p = daya dukung ujung tiang pipa, yang berkaitan dengan interaksi antara ujung tiang dan lapisan tanah dibawahnya (N)

$Q_E = Q_s$ = tahanan gesek *ultimate*, yaitu gesekan antara permukaan samping tiang dan tanah di sekitarnya (N)

Q_{AT} = kontribusi dari udara yang terperangkap di dalam tiang pipa tekan-tutup (N)



Gambar 9. Grafik gabungan daya dukung *ultimate*

Apabila dilihat dari **Gambar 9** menyajikan kontribusi dari berbagai elemen terhadap daya dukung *ultimate* tiang pipa tertutup dengan variasi diameter pipa secara keseluruhan dapat diuraikan pada **Tabel 3** berikut ini:

Tabel 3. Persentase kontribusi elemen daya dukung tiang pipa

Diameter tiang pipa		Q_{ult}	Q_p	Q_s	Q_a
inci	cm	N	% (Persentase)		
2	6	55	41.82	41.82	16.36
2.5	7.6	72	44.44	38.89	16.67
3	8.9	94	46.28	37.23	16.49
4	11.4	135	48.15	30.37	21.49

Sumber: Hasil Penelitian, 2023

Berdasarkan **Tabel** , dapat dilihat bahwa kontribusi

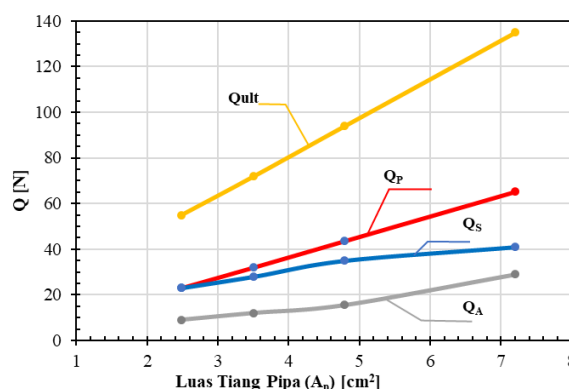
dari tiap elemen daya dukung bervariasi. Kontribusi Q_p (ujung tiang) cenderung meningkat dengan peningkatan daya dukung total. Kontribusi Q_s (gesekan samping) menurun seiring dengan peningkatan Q_{TT} . Sementara itu, kontribusi Q_{AT} (udara terperangkap) cenderung stabil atau sedikit meningkat dengan peningkatan daya dukung total.

Tabel menunjukkan hasil daya dukung *ultimite* beserta komponen penunjang pada setiap variasi diameter tiang pipa.

Tabel 4. Daya dukung ultimate tiang pipa

Diameter Tiang Pipa		Daya Dukung <i>Ultimate</i> Tiang Pipa [N]				
Inch	cm	Q_{TT}	Q_{TB}	$Q_E = Q_s$	Q_p	Q_a
2	6	55	46	23	23	9
2.5	7.6	72	60	28	32	12
3	8.9	94	78.5	35	43.5	15.5
4	11.4	135	106	41	65	29

Sumber: Hasil Penelitian, 2023



Gambar 10. Grafik hubungan luas permukaan ujung tiang (A_p) terhadap daya dukung tiang (Q)

Luas ujung tiang (atau diameter tiang) memiliki pengaruh signifikan terhadap daya dukung setiap elemen fondasi. Setiap elemen, seperti ujung tiang (Q_p), gesekan samping (Q_s), dan udara terperangkap Q_{AT} , dipengaruhi oleh perubahan luas ujung tiang dalam cara yang berbeda, seperti terlihat pada **Gambar 10**. Berikut adalah penjelasan pengaruh luas ujung tiang pada masing-masing elemen daya dukung tiang pipa PVC:

1. Daya Dukung Ujung Tiang Q_p :

- Konsep: Daya dukung ujung tiang adalah beban yang langsung ditransfer melalui ujung tiang ke lapisan tanah yang lebih keras di bawahnya.
- Pengaruh Luas Ujung Tiang: Ketika luas ujung tiang meningkat, daya dukung ujung tiang juga meningkat secara proporsional karena beban distribusi langsung tersebar ke area yang lebih luas.
- Hubungan: Kapasitas ujung tiang berbanding

lurus dengan luas penampang ujung. Semakin besar luas penampang ujung, semakin besar beban yang dapat ditopang oleh tiang.

2. Daya Dukung Gesekan Samping (Q_s):

- Konsep: Daya dukung gesekan samping adalah gaya gesekan antara permukaan samping tiang dengan tanah di sekitarnya.
- Pengaruh Luas Ujung Tiang: Ketika luas ujung tiang meningkat, diameter tiang juga biasanya meningkat, yang berarti panjang kontak permukaan samping dengan tanah juga bertambah.
- Hubungan: Gesekan samping berbanding lurus dengan luas permukaan samping yang bersentuhan dengan tanah. Dengan meningkatnya diameter, luas permukaan samping bertambah, yang meningkatkan daya dukung gesekan samping.

3. Daya Dukung Udara Terperangkap (Q_u):

- Konsep: Udara terperangkap di dalam tiang tertutup berfungsi sebagai bantalan tekanan yang membantu mendukung beban secara tidak langsung.
- Pengaruh Luas Ujung Tiang: Ketika luas ujung tiang meningkat (dengan diameter yang lebih besar), volume udara yang terperangkap di dalam tiang juga meningkat.
- Hubungan: Semakin besar volume udara yang terperangkap, semakin tinggi tekanan yang dapat dihasilkan, meningkatkan efek apung dan memberikan daya dukung tambahan.

Secara keseluruhan, peningkatan luas ujung tiang memiliki pengaruh positif pada semua elemen daya dukung, baik ujung tiang, gesekan samping, maupun udara terperangkap. Luas ujung yang lebih besar memungkinkan kapasitas dukung ujung tiang meningkat, sedangkan diameter yang lebih besar meningkatkan daya dukung gesekan samping dan udara yang terperangkap.

Untuk memahami hubungan antara daya dukung masing-masing elemen dan persentase peningkatan daya dukung, terlihat pada **Tabel 5** bagaimana setiap elemen berkontribusi terhadap peningkatan total daya dukung (Q_{ult}).

Hasil ini menunjukkan bahwa udara terperangkap tidak hanya berfungsi sebagai elemen pasif, tetapi juga sebagai faktor penting yang dapat meningkatkan stabilitas dan daya dukung fondasi. Hal ini khususnya penting dalam kondisi tanah lunak, di mana setiap peningkatan daya dukung dapat secara signifikan mempengaruhi stabilitas struktur yang didukung oleh fondasi tersebut.

Temuan ini membuka peluang baru untuk penggunaan PVC sebagai material fondasi, terutama di

kondisi tanah lunak yang memerlukan solusi inovatif. Dengan memahami peran kritis udara terperangkap, desainer fondasi dapat mengoptimalkan penggunaan material PVC untuk mencapai stabilitas dan efisiensi yang lebih tinggi.

Tabel 5. Persentase peningkatan daya dukung tiang pipa

Diameter Tiang Pipa		Daya Dukung <i>Ultimate</i> Tiang Pipa [N]				Peningkatan daya dukung (%)			
Inci	cm	Q_{TT}	Q_s	Q_p	Q_u	Q_{TT}	Q_s	Q_p	Q_u
2	6	55	23	23	9				
2.5	7.6	72	28	32	12	30.9	21.7	39.1	33.3
3	8.9	94	35	43.5	15.5	70.9	52.2	89.1	72.2
4	11.4	135	41	65	29	145.5	78.3	182.6	222.2

Sumber: Hasil Penelitian, 2023

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini, yang berfokus pada analisis daya dukung aksial fondasi tiang pipa PVC dengan pengaruh udara terperangkap di tanah lunak berdasarkan model skala laboratorium, menunjukkan hasil yang signifikan. Peningkatan diameter pipa PVC sebesar 25%, 50%, dan 100% memberikan peningkatan daya dukung total secara berturut-turut sebesar 31%, 71%, dan 146%. Selain itu, daya dukung ujung tiang mengalami kenaikan sebesar 39.1%, 89.1%, dan 131.3%, sedangkan daya dukung akibat skin friction meningkat sebesar 21.7%, 52.2%, dan 64.3% seiring dengan peningkatan diameter pipa. Efek apung dari udara terperangkap berkontribusi signifikan terhadap daya dukung aksial, dengan peningkatan kontribusi hingga 222.2%. Hasil ini menunjukkan bahwa udara terperangkap di dalam tiang pipa PVC tidak hanya meningkatkan daya dukung aksial, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan stabilitas fondasi di tanah lunak. Penelitian ini mendukung pemanfaatan tiang pipa PVC sebagai solusi fondasi yang efektif dan inovatif, terutama dalam kondisi tanah lunak yang memerlukan peningkatan kapasitas dukung yang lebih besar.

Saran

Penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam bidang fondasi dan teknik sipil dengan menunjukkan bahwa faktor yang sebelumnya kurang diperhatikan, seperti udara terperangkap, dapat secara signifikan mempengaruhi daya dukung fondasi. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi aplikasi praktis dari temuan ini, termasuk penggunaan pipa PVC dalam berbagai kondisi tanah yang berbeda. Selain itu, modifikasi desain fondasi yang mempertimbangkan efek udara

terperangkap dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas fondasi. Uji coba lapangan dalam skala yang lebih besar juga direkomendasikan untuk memastikan validitas dan keandalan temuan ini dalam kondisi nyata.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Braja M Das, *Principles of Foundation Engineering*, 8th ed. 2016.
- [2] Isnaniati and I. B. Mochtar, "Increasing the Bearing Capacity of Shallow Foundations on Soft Soil After the Installation of Micro-Piles," *Journal of the Civil Engineering Forum*, pp. 227–238, Jul. 2023, doi: 10.22146/jcef.5925.
- [3] J. Gultom, H. Pratikso, A. Rochim, and S. Taufik, "Behavior of Piled Raft Foundation in Soft Clay Layer with Geo-Foam Application," *Budapest International Research and Critics Institute-Journal (BIRCI-Journal)*, pp. 9629–9637, 2021, doi: 10.33258/birci.v4i4.2985.
- [4] S. Srihandayani, "Alternative foundation for reducing building losses due to foundation failure in soft soil," in *E3S Web of Conferences*, 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202015602006.
- [5] S. S. Gue and C. S. Gue, "Geotechnical Challenges on Soft Ground," *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 84–96, Aug. 2022, doi: 10.33736/jcest.4760.2022.
- [6] R. Kumar, "Soil Improvement Techniques for Soft Soils," 2023, doi: 10.13140/RG.2.2.33607.06560.
- [7] F. Qiao *et al.*, "Study on the dynamic characteristics of soft soil," *RSC Adv*, vol. 10, no. 8, pp. 4630–4639, 2020, doi: 10.1039/c9ra05700e.
- [8] Jiang, Huang, Ma, and Luo, "Analysis of Strength Development and Soil–Water Characteristics of Rice Husk Ash–Lime Stabilized Soft Soil," *Materials*, vol. 12, no. 23, p. 3873, Nov. 2019, doi: 10.3390/ma12233873.
- [9] M. Deeb *et al.*, "Using constructed soils for green infrastructure - Challenges and limitations," *SOIL*, vol. 6, no. 2, pp. 413–434, Sep. 2020, doi: 10.5194/soil-6-413-2020.
- [10] S. Hemedi, *Geotechnical Engineering. Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020.
- [11] S. Srihandayani and M. Mera, "Analysis of the behaviour of the floating pipe pile foundation on soft soil," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202346409006.
- [12] T. Harianto, A. Arsyad, and W. Effendi, "Studi Deformasi Perkuatan Tanah Lunak dengan Cericuk Miring," *Teknik Sipil Hasanuddin*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, Mar. 2020.
- [13] A. Zhafirah, "Karakteristik Tanah Kawasan Gedebage Kota Bandung Berdasarkan Hasil Uji Lapangan Dan Laboratorium," *Jurnal Konstruksi*, 2020, doi: 10.33364/konstruksi/v.17-2.776.
- [14] A. Desiani, "Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Soil Binder," *Jurnal Teknik Sipil*, 2019, doi: 10.28932/jts.v8i1.1356.
- [15] Y. Amran and I. Permadi, "Analisis Perubahan Sifat Mekanis Tanah Gambut Pada Stabilisasi Tanah Secara Kimiawi Menggunakan Difasol Stabilizer Dan Semen," *Tapak (Teknologi Aplikasi Konstruksi) Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 2021, doi: 10.24127/tp.v10i2.1585.
- [16] N. Silmi Surjandari, L. Belakang, and L. Teori efek apung, "Analisa Penurunan Pondasi Rakit Pada Tanah Lunak."
- [17] Y. Li, C. Yu, L. Yao, J. Wu, and X. Liu, "Study on Mechanical Properties of Composite Foundation with Rigid Pile Based on the Cushion and Strength Adjustor Control," *Processes*, vol. 11, p. 539, Feb. 2023, doi: 10.3390/pr11020539.
- [18] SNI 8460, "Persyaratan Perancangan Geoteknik," 2017. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [19] S. Hamed and Ulker, *Geotechnical Engineering Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020.
- [20] Q. Yan and L. Liu, "Study on Vertical Vibration of Partially Exposed Friction Pipe Pile Groups Based on Fictitious Soil Pipe Pile Model," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01449-5.
- [21] A. Mandolini, G. Russo, and C. Viggiani, "Pile foundations: Experimental investigations, analysis and design," Netherlands, 2005.
- [22] S. Hu and F. Liang, "Settlement Analysis of Pre-stressed Concrete Pipe-Pile Foundations in Soft Ground: A Case Study," *Journal of Civil Engineering and Urban Planning*, vol. 5, no. 6, pp. 21–30, 2023, doi: 10.23977/jceup.2023.050604.
- [23] S. Srihandayani, A. Hakam, M. Mera, and F. A. Ismail, "Bearing Capacity Analysis of Floating Foundation Model in Homogeneous Very Soft Clay," *Civil and Environmental Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 758–771, Dec. 2023, doi: 10.2478/cee-2023-0069.
- [24] A. Hakam Novrial, A. Hakam, and I. Faisal

- Pane, "Load Capacity of Floating Raft-Pile," *Jurnal Arsitektur "ATRIUM,"* vol. 2, no. 1, pp. 1–14, Apr. 2005.
- [25] S. Srihandayani, D. Putri, N. Kurniasih, and L. D. Putri, "Bearing capacity of floating foundations used PVC (Poly Vinyl Chloride) on soft soil with the scale model in the field," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, no. 2.5 Special Issue 5, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i2.5.13957.
- [26] W. Aska Alawiah and Y. A. Yakin, "Analisis Daya Dukung Tiang Tunggal Statik pada Tanah Lunak di Gedebage," 2016.
- [27] M. Kurnia, "Studi Pondasi Apung (Floating foundation) pada Tanah Lunak dan Tanah Organik di Gedebage Bandung," 2017.
- [28] J. Wu, L. Pu, and C. Zhai, "A Review of Static and Dynamic p-y Curve Models for Pile Foundations," *Buildings*, vol. 2024, p. 1507, May 2024, doi: 10.3390/buildings14061507.