

Analisis Pengaruh Tahanan Gesek Negatif Akibat Ketinggian Timbunan Berdasarkan Data CPT

Alyssa Maulidina¹, Putera Agung Maha Agung^{2*}, Aldo Wirastana Adinegara³, Muhammad Fathur Rouf Hasan⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia

⁴Sekolah Pascasarjana, Universitas Brawijaya, Indonesia

²Corresponding Author : putera.agungmagung@sipil.pnj.ac.id*

Abstract

Soft soil is a major challenge in construction projects due to its low bearing capacity and its tendency to undergo settlement under loading, especially with high embankments. One of the consequences of this condition is the development of negative skin friction on pile foundations, which can significantly reduce their bearing capacity. This study aims to analyze the influence of embankment height on the magnitude of negative skin friction based on Cone Penetration Test (CPT) data and to evaluate its impact on pile foundation stability. The primary data was obtained from CPT results at point S – 6, which include soil parameters such as q_c , f_s , and soil classification. The calculation results show that negative skin friction increases with higher embankment levels, with the highest value observed at a 3.5 meter embankment height, however the increase is not linear. Despite the additional load caused by negative skin friction, both group and single pile foundations still meet the safety criteria. In addition, the elastic settlement remains below the allowable limit. Based on these findings, it can be concluded that while negative skin friction must be considered in foundation design, the pile foundations at the study site remain safe against the effects of high embankments.

Keywords : CPT data, embankment, negative skin friction, soft soil.

Abstrak

Tanah lunak merupakan salah satu permasalahan dalam pekerjaan konstruksi karena memiliki daya dukung rendah dan mudah mengalami penurunan ketika menerima beban, khususnya akibat timbunan. Kondisi tersebut dapat menimbulkan gaya gesek negatif pada pondasi tiang pancang yang berpotensi mengurangi kapasitas daya dukung tiang. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh ketinggian timbunan terhadap besarnya gaya gesek negatif berdasarkan data Cone Penetration Test (CPT) serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap stabilitas pondasi tiang. Data utama diperoleh dari hasil CPT pada titik S-6 berupa nilai cone resistance (q_c), sleeve friction (f_s), dan klasifikasi tanah. Analisis dilakukan pada beberapa variasi ketinggian timbunan untuk menentukan perubahan gaya gesek negatif pada kelompok tiang. Hasil menunjukkan bahwa gaya gesek negatif meningkat seiring bertambahnya ketinggian timbunan dan mencapai nilai maksimum sebesar 11,60 ton pada ketinggian timbunan 3,5 m pada konfigurasi tiga tiang. Meskipun terdapat tambahan beban akibat gaya gesek negatif, kapasitas daya dukung grup tiang sebesar 24,90 ton masih lebih besar dibandingkan beban maksimum yang bekerja, sedangkan penurunan elastis tetap berada di bawah batas izin 25 mm. Berdasarkan hasil tersebut, pondasi tiang pancang pada lokasi penelitian masih memenuhi kriteria keamanan terhadap pengaruh gaya gesek negatif akibat variasi ketinggian timbunan.

Kata Kunci : data CPT, gaya gesek negatif, tanah lunak, timbunan.

Diterima Redaksi : 01-08-2026 | Selesai Revisi : 09-08-2026 | Diterbitkan Online : 25-08-2026

1. Pendahuluan

Pekerjaan konstruksi di atas tanah lunak masih menjadi tantangan besar dalam dunia teknik sipil, terutama karena karakteristik tanah ini yang memiliki daya dukung rendah, tingkat konsolidasi tinggi, serta permeabilitas yang rendah [9], [6], [13]. Tanah lunak sangat rentan mengalami penurunan, apabila menerima beban tambahan, baik dari struktur bangunan maupun timbunan tanah. Salah satu dampak signifikan dari kondisi ini adalah munculnya gaya gesek negatif (*negative skin friction*) pada pondasi tiang pancang. Gaya ini, merupakan beban tambahan yang bekerja ke

bawah pada permukaan tiang, akibat pergerakan tanah yang lebih besar, daripada pergerakan tiang itu sendiri [13], [18]. Apabila tidak diperhitungkan secara tepat, gaya gesek negatif dapat menurunkan kapasitas daya dukung pondasi secara signifikan, sehingga berisiko terhadap kestabilan struktur secara keseluruhan.

Gaya gesek negatif merupakan fenomena yang terjadi ketika penurunan tanah di sekitar tiang lebih besar dibandingkan penurunan tiangnya, sehingga menimbulkan gaya tarik aksial ke arah bawah pada elemen fondasi tersebut [15], [19], [13]. Salah satu variabel yang terbukti memiliki pengaruh signifikan

terhadap pembentukan gaya ini adalah tinggi timbunan [13]. Peningkatan tinggi timbunan berpotensi memperbesar konsolidasi tanah, selanjutnya dapat meningkatkan nilai gaya gesek negatif [19], [13]. Meskipun demikian, kajian terhadap pengaruh tinggi timbunan secara kuantitatif masih relatif terbatas, terutama yang didasarkan pada data lapangan, seperti hasil *Cone Penetration Test* [16], [17].

Permasalahan gaya gesek negatif menjadi semakin kompleks, ketika proyek pembangunan melibatkan timbunan dengan tinggi yang bervariasi. Timbunan tinggi berpotensi menimbulkan tekanan berlebih pada tanah lunak, kemudian menyebabkan konsolidasi dan pergerakan tanah secara vertikal. Pergerakan inilah yang menjadi pemicu utama gaya gesek negatif. Oleh karena itu, penting untuk memahami seberapa besar pengaruh tinggi timbunan terhadap timbulnya gaya gesek negatif dan bagaimana kondisi tersebut mempengaruhi stabilitas pondasi.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji gaya gesek negatif pada pondasi tiang, namun masih terdapat celah dalam hal keterkaitan antara tinggi timbunan dan data lapangan. Chalajour dan Blatz, meneliti gaya gesek negatif akibat timbunan jembatan menggunakan data lapangan dan simulasi numerik, namun fokusnya pada tiang baja dan tidak membahas pengaruh tinggi timbunan secara spesifik [20]. Liang dkk., menggunakan pendekatan numerik berbasis model elasto – viskoplastik untuk menganalisis pengaruh creep tanah lunak terhadap gaya gesek negatif, tetapi tidak memasukkan variabel tinggi timbunan dalam kajiannya [19]. Martinez dan O'Hara, mengkaji arah gaya gesek pada permukaan tiang bertekstur dalam kondisi pasir kering melalui uji sentrifugal, yang kurang relevan dengan kondisi tanah lunak jenuh dan timbunan [2]. Ketiga penelitian ini, menunjukkan bahwa meskipun studi tentang gaya gesek negatif telah banyak dilakukan, belum ada yang secara langsung mengkaji pengaruh tinggi timbunan terhadap besar gaya gesek negatif dengan pendekatan berbasis data sondir (CPT), khususnya pada kondisi tanah lunak di Indonesia [5], [12], [15], [13].

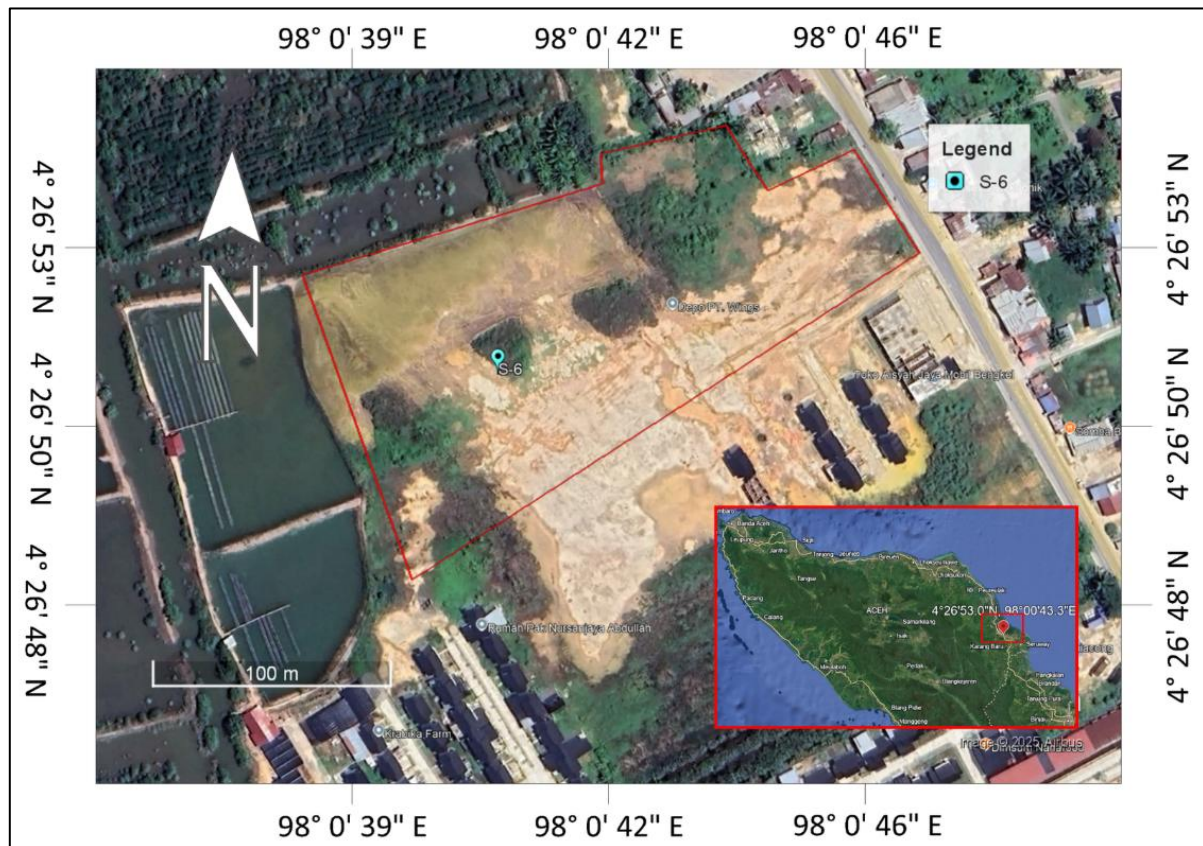
Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah tersebut, dengan tujuan utama menganalisis pengaruh tinggi timbunan terhadap besarnya gaya gesek negatif yang berdasarkan data lapangan hasil uji CPT.

Selain itu, studi ini juga mengevaluasi dampak gaya gesek negatif terhadap stabilitas pondasi tiang, baik secara individu maupun dalam konfigurasi grup. Fokus kajian, dilakukan pada Proyek X di Nanggroe Aceh Darussalam yang memiliki kondisi tanah dominan berupa lempung kelanauan organik dan lanau lempung kepasiran, dengan konsistensi bervariasi dari sangat lunak hingga keras. Dengan pendekatan analitis yang berbasis data CPT pada titik S – 6, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perencanaan pondasi tiang pancang yang lebih aman dan efisien pada tanah lunak dengan beban timbunan yang tinggi.

2. Material dan Metode

Tahanan Gesek Negatif (Q_{neg}) adalah gaya tarik ke bawah pada tiang pancang yang menambah beban, terjadi saat tanah di sekitar tiang turun lebih besar, akibat konsolidasi dari timbunan tinggi. Analisis Q_{neg} ini, memanfaatkan data CPT untuk mengidentifikasi lapisan tanah lunak dan menghitung parameter tanah. Besarnya Q_{neg} , kemudian ditentukan dengan mempertimbangkan properti tanah, dimensi tiang, serta penurunan dan tegangan efektif. Nilai Q_{neg} ini, selanjutnya ditambahkan pada beban tiang untuk analisis stabilitas, memastikan keamanan pondasi [10], [11].

Penelitian ini (Gambar 1), dilaksanakan pada Proyek X, Nanggroe Aceh Darussalam. Pengambilan data ini, dilakukan dari area yang menggunakan penyelidikan tanah dengan CPT pada titik S – 6. Berdasarkan data hasil penyelidikan tanah, kondisi tanah dasar pada Proyek X, didominasi oleh lapisan lempung kelanauan organik dan lanau lempung kepasiran, dengan konsistensi yang bervariasi, mulai dari sangat lunak hingga sangat keras. Keberadaan lapisan tanah lunak tersebut, berpotensi menimbulkan gaya gesek negatif (*negative skin friction*) pada tiang pancang yang terjadi akibat penurunan konsolidasi tanah lunak, ketika menerima beban dari timbunan atau struktur di atasnya. Gaya gesek negatif ini, dapat mengurangi kapasitas daya dukung efektif tiang pancang, sehingga perlu menjadi perhatian khusus dalam perencanaan pondasi, terutama pada area yang dilalui oleh lapisan – lapisan tanah dengan karakteristik lunak tersebut.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

2.1. Teknik Pengambilan Data

Teknik pengambilan data pada penelitian ini, diawali dengan studi literatur, yaitu mengumpulkan berbagai referensi ilmiah, seperti jurnal, buku, dan artikel teknis yang berkaitan dengan gaya gesek negatif pada tiang pancang akibat tinggi timbunan. Tujuannya adalah untuk memperkuat dasar teori dan memahami konsep – konsep teknis yang mendasari analisis dalam penelitian ini. Studi literatur juga membantu penulis dalam memilih metode analisis yang paling relevan, seperti metode Schmertmann untuk perhitungan daya dukung tiang berdasarkan data CPT [8] , [12] , [15].

Setelah studi literatur, pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan data sekunder dari dokumen proyek yang telah ada, yaitu Proyek X di Nanggroe Aceh Darussalam. Data yang diperoleh meliputi hasil uji CPT, gambar perencanaan konstruksi, serta informasi pembebanan dan material struktur. Penelitian ini, berfokus pada variabel utama berupa parameter tanah, seperti kadar air, berat jenis, dan sudut geser dalam yang sangat penting untuk mengevaluasi daya dukung tiang dan pengaruh gaya gesek negatif. Data geoteknik diperoleh melalui uji lapangan menggunakan alat sondir, yang menghasilkan nilai tahanan ujung konus (q_c) dan gesekan selimut (f_s) secara kontinu pada kedalaman tertentu. Titik uji yang digunakan dalam analisis adalah titik S – 6, karena dianggap paling representatif terhadap kondisi tanah di bawah struktur utama.

Data hasil CPT kemudian diolah untuk mendapatkan parameter tanah, seperti q_c , f_s , klasifikasi jenis tanah, dan berat volume tanah. Selain itu, data struktur digunakan untuk mengetahui besar beban yang bekerja pada tiang pancang, dihitung melalui analisis struktur dengan perangkat lunak ETABS. Semua data tersebut, menjadi input dalam perhitungan daya dukung aksial tiang, gaya gesek negatif, serta evaluasi stabilitas pondasi menggunakan metode empiris yang sesuai. Teknik pengumpulan data ini, bertujuan agar hasil analisis mencerminkan kondisi lapangan secara realistis dan dapat digunakan dalam perencanaan pondasi yang aman.

2.2. Teknik Pengolahan dan Interpretasi Data

Pendekatan analitis untuk menentukan daya dukung aksial tiang pancang, seringkali menggunakan metode Schmertmann [8] , [12] , [15]. Metode ini, melibatkan beberapa tahapan perhitungan yang sistematis (Gambar 2). Pertama, parameter tanah diidentifikasi dari data penyelidikan tanah, seperti hasil pengujian CPT dan data laboratorium. Setelah parameter tanah diketahui, langkah selanjutnya adalah menghitung daya dukung tunggal tiang pancang. Setelah mendapatkan nilai daya dukung tunggal, perhitungan dilanjutkan untuk menentukan kapasitas daya dukung kelompok tiang pancang yang mempertimbangkan interaksi antar tiang [4] , [21] , [1]. Terakhir, analisis stabilitas dan tahanan gesek negatif dilakukan untuk memastikan keamanan dan kinerja jangka panjang

sistem tiang pancang. Dimana, untuk daya dukung tiang pancang yang berdasarkan data CPT, dianalisis menggunakan persamaan sebagai berikut [3] :

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s = q_p \cdot A_p + f \cdot A_s \dots\dots\dots (1)$$

dengan Q_p adalah kapasitas tahanan di ujung tiang (kN), Q_s adalah kapasitas tahanan kulit (kN), q_p adalah kapasitas daya dukung (kN/m²), A_p adalah luas di ujung tiang pancang (m²), f adalah satuan tahanan kulit persatuan luas (kN/m²), serta A_s adalah luas selimut tiang pancang (m²).

Ketika timbunan berada di atas muka air tanah, berat volume efektif tanah (γ'), digantikan oleh berat volume total (γ). Dalam situasi ini, muncul tegangan negatif (atau gaya tarik ke bawah) pada selimut tiang, membentang dari permukaan tanah ($z = 0$) hingga kedalaman tertentu yang disebut sebagai kedalaman netral atau $z = L_1$ [3]. Dimana kedalaman netral, digunakan untuk mendapatkan besarnya gaya gesek negatif, melalui persamaan berikut [7] :

$$Q_{u(n)} = (pK'\gamma'_f H_f \tan \delta') L_1 + \frac{L_1^2 pK'\gamma'_f \tan \delta'}{2} \dots\dots\dots (2)$$

dengan L adalah panjang tiang (m), K' adalah koefisien tekanan tanah ($K_o = 1 - \sin \phi'$), σ'_o adalah tegangan efektif vertikal pada kedalaman $z = \gamma_f z$ (kN/m²), γ_f adalah berat satuan efektif tanah urug (kN/m³), γ' adalah berat volume efektif tanah (kN/m³), δ' adalah sudut gesek antara tanah dan tiang pancang $\approx 0.5 - 0.7 \phi' (^\circ)$, serta H_f adalah tinggi timbunan (m).

3. Hasil dan Pembahasan

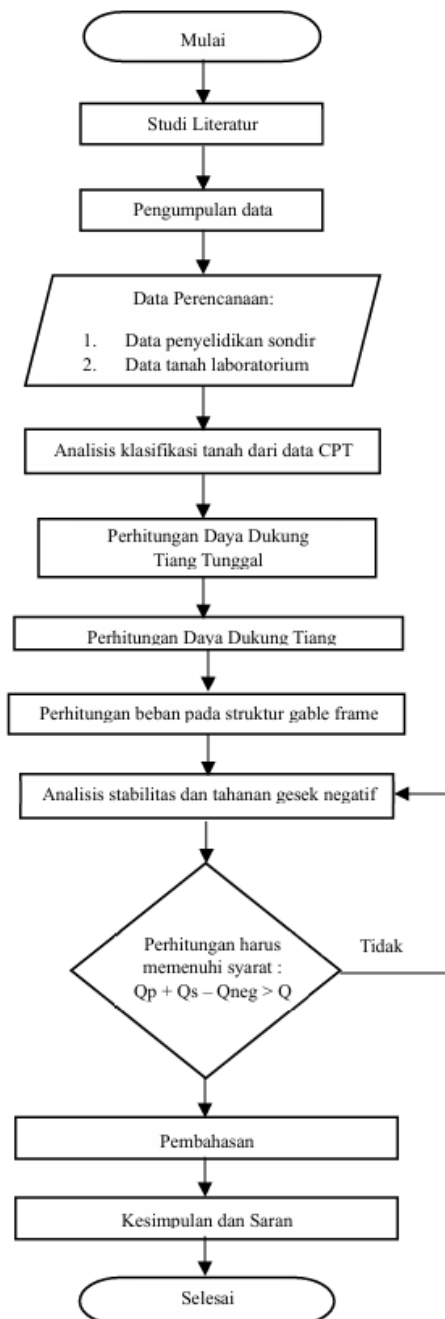
3.1. Data Tanah

Pengujian CPT di titik S – 6, mengindikasikan bahwa tanah di area proyek, tersusun dari berbagai jenis lapisan, antara lain lempung kelanauan organik, lanau lempung bercampur pasir, serta pasir lanauan. Variasi jenis tanah ini, sangat memengaruhi respons tanah terhadap beban vertikal, khususnya dalam pembentukan gaya gesek negatif pada pondasi tiang.

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, parameter tanah pada titik pengujian CPT (S – 6), meliputi klasifikasi tanah, berat jenis (G_s), berat isi jenuh (γ_{sat}), berat isi kering (γ_{dry}), kadar air (w_n), unconfined compressive strength (C_u), sudut geser tanah (ϕ), serta koefisien permeabilitas (k) yang diperoleh dari korelasi dengan data CPT, seperti nilai q_c , f_s , dan FR. Hasil uji menunjukkan, nilai *cone resistance* (q_c) berkisar antara 2.32 hingga 84.09 kg/cm². Nilai q_c yang rendah, ditemukan pada lapisan lempung sangat lunak di bagian atas, sementara nilai yang lebih tinggi berada pada lapisan pasir lanauan di kedalaman. Selain itu, nilai *sleeve friction* (f_s) yang rendah pada lempung organik, mencerminkan rendahnya daya tahan gesek antara tanah dan permukaan tiang. Rasio antara q_c dan f_s , menunjukkan bahwa sebagian besar lapisan tanah memiliki karakteristik kohesif.

Tanah dengan nilai q_c dibawah 10 kg/cm², umumnya bersifat sangat lunak dan memiliki potensi besar untuk mengalami konsolidasi [15] , [13].

Dengan modulus deformasi yang rendah dan tingkat permeabilitas yang kecil, proses konsolidasi akan berlangsung secara lambat, tetapi menghasilkan penurunan yang signifikan seiring waktu [13] , [14]. Kondisi ini, menjadi faktor utama dalam timbulnya gaya gesek negatif, terutama setelah konstruksi selesai.



Gambar 2. Diagram Alir Stabilitas Gaya Gesek Negatif

Selain itu, parameter lain, seperti nilai c_u (kohesi tidak terkonsolidasi), sudut geser dalam (ϕ), dan permeabilitas (k) juga menunjukkan variasi signifikan antar lapisan. Tanah permukaan, memiliki nilai c_u rendah dan permeabilitas kecil, menandakan potensi besar untuk terjadi penurunan konsolidasi. Sebaliknya, lapisan yang lebih dalam akan lebih stabil, dikarenakan memiliki parameter mekanik yang lebih baik untuk menopang pondasi.

Tabel 1. Parameter Tanah Pada Data CPT (Titik S – 6)

Depth (m)	Jenis Tanah (CPT)	q_c (kg/cm ²)	q_t (MPa)	f_s (kg/cm ²)	F_R (%)	G_s	γ_{sat} (t/m ³)	γ_d (t/m ³)	w_n (%)	C_u kg/cm ²	ϕ (°)	k (cm/det)	γ_t (t/m ³)	σ_v (kg/cm ²)
0.0 – 2.0	Clay	3.364	0.343	0.265	7.118	2.746	1.650	1.400	17.857	0.673	3.50	0.0000006	2.88	5.49
2.0 – 4.0	Clay	9.400	0.959	0.381	4.118	2.740	1.680	1.420	18.310	1.880	5.00	0.0000008	2.88	10.97
4.0 – 7.0	Sandy Silt to Clayey Silt	30.733	3.134	0.556	1.832	2.680	1.800	1.430	25.874	6.147	31.15	0.0015	2.88	19.01
7.0 – 19.0	Silty Clay to Clay	12.317	1.256	0.393	3.362	2.660	1.880	1.589	18.313	2.463	10.50	0.0000019	2.88	50.93
19.0 – 23.2	Sandy Silt to Clayey Silt	27.190	2.773	0.571	2.184	2.672	1.876	1.530	22.614	5.438	30.44	0.00167	2.88	62.15
23.2 – 24.8	Sandy Silt to Clayey Silt	34.125	3.480	0.618	1.814	2.665	1.890	1.570	20.382	6.825	31.83	0.0032	2.88	66.42
24.8 – 26.0	Silty Sand to Sandy Silt	40.833	4.164	0.716	1.787	2.653	1.900	1.600	18.750	8.167	28.28	0.0068	2.88	69.60
26.0 – 28.2	Sand to Sandy Silt	84.091	8.575	0.906	1.294	2.650	2.000	1.600	25.000	16.818	33.48	0.00897	2.88	75.43

3.2. Data Pembebanan

Data pembebanan, diperoleh dari pemodelan struktur menggunakan perangkat lunak ETABS yang mensimulasikan beban vertikal dan momen akibat beban eksentris pada struktur atas. Dapat dilihat dalam Tabel 2, beban vertikal terbesar berada pada As. 1 – A, titik ini digunakan sebagai analisis utama, dimana beban vertikal mencapai 23.157 ton. Momen pada arah x dan y relatif kecil, namun tetap diperhitungkan untuk menghitung eksentrisitas dan stabilitas pondasi. Data pembebanan ini, menjadi dasar dalam perhitungan daya dukung, penurunan elastis, dan pengaruh gaya gesek negatif.

Tabel 2 tentang data pembebanan dibawah ini, juga memperlihatkan variasi nilai gaya vertikal (P_v), momen terhadap arah x (M_x) dan arah y (M_y), serta gaya horizontal (F_x dan F_y) pada setiap titik analisis. Parameter – parameter tersebut, berperan penting dalam menilai distribusi beban sepanjang tiang, serta memperkirakan potensi terjadinya gaya gesek negatif. Dengan mengetahui besarnya gaya dan momen pada masing – masing titik, analisis lebih lanjut terhadap interaksi antara tanah dan struktur dapat dilakukan secara lebih presisi, terutama dalam kaitannya dengan beban eksentris dan deformasi akibat proses konsolidasi tanah.

Tabel 2. Data Pembebanan Pada As. 1 – A

As.	P_v		M_x		M_y		F_x		F_y	
	kN	ton	kN · m	ton · m	kN · m	ton · m	kN	ton	kN	ton
A-1	231.569	23.157	0.013	0.001	3.546	0.355	1.846	0.185	49.468	4.947
A ₂ -1	184.899	18.490	0.106	0.011	0.031	0.003	0.011	0.001	2.514	0.251
C ₃ -1	183.131	18.313	0.109	0.011	0.008	0.001	0.001	0.000	3.755	0.376
B-1	180.058	18.006	0.104	0.010	0.491	0.049	0.255	0.026	3.201	0.320
C-1	179.290	17.929	0.135	0.014	1.019	0.102	0.534	0.053	3.129	0.313
C ₁ -1	178.936	17.894	0.063	0.006	0.012	0.001	0.001	0.000	1.869	0.187
C ₂ -1	178.896	17.890	0.083	0.008	0.010	0.001	0.001	0.000	2.444	0.244
A ₃ -2	178.731	17.873	0.081	0.008	0.007	0.001	0.001	0.000	1.963	0.196
B ₁ -1	175.718	17.572	0.213	0.021	0.053	0.005	0.006	0.001	4.298	0.430
B ₃ -2	175.542	17.554	0.176	0.018	0.064	0.006	0.007	0.001	4.260	0.426
B ₂ -1	165.987	16.599	0.170	0.017	0.248	0.025	0.097	0.010	3.469	0.347
D-1	82.962	8.296	2.164	0.216	0.096	0.010	0.021	0.002	42.020	4.202
A ₁ -1	80.930	8.093	0.013	0.001	0.582	0.058	0.166	0.017	4.880	0.488

3.3. Analisis Daya Dukung Aksial Tiang Pancang Berdasarkan Data Sondir

Analisis kapasitas daya dukung tiang pancang dilakukan dengan metode Schmertmann, yang menggunakan data q_c dari uji CPT [8] , [12] , [15]. Berdasarkan hasil perhitungan, daya dukung ultimit (Q_u)

untuk tiang tunggal sebesar 5.92 ton, sedangkan untuk grup tiang mencapai 24.90 ton. Nilai ini, menunjukkan bahwa tanah di sekitar grup tiang mampu mendistribusikan beban secara efektif. Friksi samping dan daya dukung ujung tiang pun, bekerja secara lebih optimal pada konfigurasi grup.

Kapasitas yang lebih besar pada grup tiang, turut dipengaruhi oleh peningkatan luas permukaan total yang bekerja menahan beban. Tanah di lokasi proyek, menunjukkan karakteristik yang mendukung untuk perencanaan pondasi. Selain itu, desain grup tiang yang efisien, menjadi faktor penting dalam pencapaian kapasitas daya dukung yang tinggi. Hal ini, membuktikan bahwa kombinasi antara kondisi tanah dan konfigurasi tiang yang tepat dapat meningkatkan performa struktur.

Dalam konfigurasi grup tiang, metode efisiensi Converse – Labarre digunakan dengan jumlah tiga tiang dan jarak antar tiang sebesar 3D. Efisiensi grup sebesar 0.9 menghasilkan kapasitas total 16.02 ton. Penurunan elastis yang terjadi sebesar 3.224 mm, jauh lebih kecil dari ambang batas maksimum sebesar 25 mm. Ini mengindikasikan, bahwa deformasi akibat beban dan konsolidasi tanah, tidak akan mengganggu fungsi struktur. Dengan demikian, pondasi dinilai aman terhadap beban vertikal yang bekerja.

3.4. Analisis Daya Dukung Lateral Tiang Pancang

Analisis stabilitas lateral menggunakan pendekatan parameter β dan modulus reaksi tanah, menunjukkan bahwa tiang tergolong panjang ($\beta L > 2,5$) yang mampu menahan momen lentur dan gaya lateral akibat deformasi tanah. Pendekatan ini, didasarkan pada teori balok elastik pada media semi – absolut yang banyak digunakan dalam perencanaan fondasi tiang terhadap beban horizontal. Penentuan nilai β dan modulus reaksi tanah, dilakukan berdasarkan parameter tanah hasil uji sondir dan pengamatan kondisi lapangan. Nilai β yang tinggi, mengindikasikan kekakuan relatif antara tiang dan tanah cukup baik, sehingga perpindahan lateral tiang dapat diminimalkan. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik tanah dan kekakuan struktur sangat penting untuk menentukan performa lateral tiang secara menyeluruh.

Berdasarkan hasil analisis beban lateral maksimum yang dihitung adalah sebesar 11.81 ton, dibandingkan dengan kapasitas daya dukung lateral pondasi grup tiang sebesar 24.90 ton. Hasil ini, menunjukkan bahwa pondasi masih berada dalam kondisi aman terhadap gaya lateral, dengan faktor keamanan yang mencukupi. Namun demikian, penting untuk dicatat bahwa nilai ini diperoleh berdasarkan pendekatan linier elastik tanpa memperhitungkan kemungkinan degradasi kekuatan tanah, akibat siklus pembebanan atau perubahan kadar air di lapangan.

Respon lateral tiang, sangat dipengaruhi oleh kekakuan tanah dan kedalaman penetrasi tiang ke dalam lapisan tanah yang lebih kaku. [1]. Tiang pancang yang hanya tertanam di dalam lapisan lempung sangat lunak, umumnya memiliki kekakuan lateral yang rendah, sehingga cenderung mengalami defleksi yang cukup besar, apabila menerima beban horizontal yang

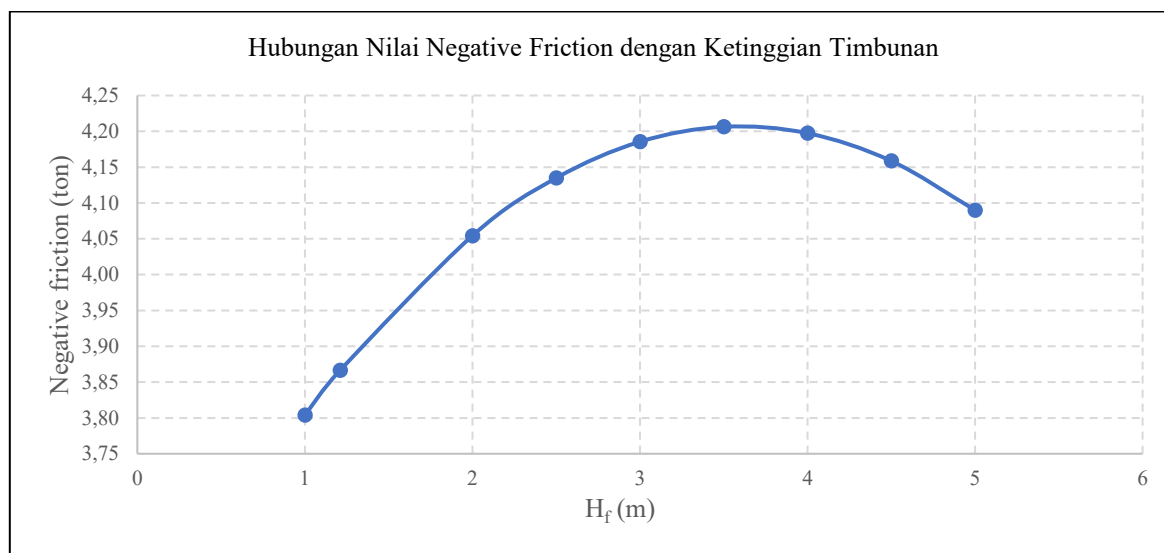
signifikan. Oleh karena itu, keberadaan lapisan tanah keras di bagian bawah menjadi sangat krusial untuk memberikan tahanan pasif yang memadai terhadap gaya lateral. Dalam konteks ini, pemanjangan tiang hingga menembus lapisan tanah keras tidak hanya bermanfaat dalam meningkatkan daya dukung aksial, tetapi juga secara signifikan memperkuat kapasitas resistensi lateral tiang terhadap gaya horizontal.

3.5. Gaya Gesek Negatif

Gaya gesek negatif muncul, ketika tanah mengalami penurunan vertikal lebih besar daripada tiang, mengakibatkan terbentuknya gaya gesekan yang bekerja ke bawah pada sisi tiang pancang [19], [13]. Variasi tinggi timbunan, sangat berpengaruh terhadap besarnya gaya ini. Semakin tinggi timbunan, semakin besar konsolidasi tanah yang terjadi, sehingga meningkatkan peluang munculnya gaya gesek negatif. Peningkatan tekanan vertikal akibat timbunan, menghasilkan tegangan efektif yang menyebabkan pergerakan vertikal tanah lebih besar dibanding tiang, menciptakan perbedaan deformasi yang memicu gaya gesek negatif. Efek ini, dapat sangat kritis terutama pada tanah lunak yang memiliki permeabilitas rendah dan waktu konsolidasi lama.

Pada tinggi timbunan 1.5 meter, gaya gesek negatif yang terjadi relatif kecil, mengingat tekanan tambahan dari timbunan belum cukup memicu konsolidasi besar. Namun, pada 2.5 meter terjadi lonjakan signifikan pada gaya gesek negatif, karena peningkatan beban vertikal menyebabkan tekanan efektif naik dan mempercepat konsolidasi primer. Hal ini, menunjukkan bahwa terdapat ambang batas tinggi timbunan, dimana tanah mulai mengalami perubahan perilaku mekanis secara signifikan. Jika tidak diperhitungkan, gaya gesek negatif yang timbul dapat menyebabkan kelebihan beban pada pondasi dan menurunkan faktor keamanan struktur.

Adapun pada Gambar 3, menunjukkan Grafik Hubungan Nilai Gesek Negatif dengan Ketinggian timbunan, pada grafik terlihat bahwa puncaknya terjadi pada tinggi timbunan 3.5 meter, dengan total gaya gesek negatif sebesar 11.6 ton pada konfigurasi tiga tiang. Namun setelah titik kritis tersebut, peningkatan gaya tidak lagi signifikan. Penurunan gaya gesek negatif pada timbunan > 3.5 m, dapat dijelaskan melalui redistribusi tegangan di tanah, dimana plastisitas tanah mulai membatasi mobilisasi gesekan. Konsep titik netral (*neutral point*), menjadi penting dalam fenomena ini. Titik ini, merupakan kedalaman di mana tiang dan tanah tidak lagi memiliki perbedaan gerakan relatif. Di atas titik netral, gaya gesek negatif terjadi di bawahnya, gaya friksi positif bekerja menahan beban. Selain itu, perubahan struktur tegangan, menyebabkan terbentuknya zona pelemahan di sekitar tiang, sehingga efisiensi interaksi tanah – tiang menurun.



Gambar 3. Grafik Hubungan Nilai Gesek Negatif dengan Ketinggian Timbunan

3.6. Stabilitas Daya Dukung Terhadap Gaya Gesek Negatif

Analisis dilakukan pada struktur pondasi (Tabel 3), dengan konfigurasi tiga tiang pancang berbentuk segitiga (As. 1 – A), dengan dimensi tiang $D = 20$ cm

dan panjang tiang $L = 12$ m. Jarak antar tiang ditentukan berdasarkan syarat geometris sebesar $2.5 D$, yaitu 50 cm. Dengan berat jenis beton sebesar 2.4 t/m^3 atau setara $0.0000024 \text{ ton/cm}^3$. Berat total pile cap dihitung sebesar 0.641 ton.

Tabel 3. Data Analisis Struktur (As. 1 – A)

Data Analisis Struktur (As. 1 – A)					
P_v		M_x		M_y	
kN	(ton)	(kN · m)	(ton · cm)	(kN · m)	(ton · m)
231.569	23.1569	0.0133	0.00133	3.5456	0.35456

Beban vertikal dari struktur atas (P_v), sebesar 23.157 ton. Tambahan beban akibat gaya gesek negatif mencapai 11.60 ton, diperoleh dari tiga tiang yang masing – masing menerima beban 3.87 ton. Dengan demikian, total beban yang harus ditahan oleh pondasi adalah 35.397 ton. Daya dukung aksial tiang tunggal (Q_u) sebesar 28.8 ton, sehingga diperlukan minimal dua tiang untuk menahan beban tersebut secara aman.

Nilai eksentrisitas dihitung, berdasarkan selisih jarak antara pusat massa beban dan pusat sistem pondasi, kemudian digunakan untuk menghitung momen lentur (M_y dan M_x) pada arah x dan arah y. Nilai eksentrisitas ini, penting untuk menentukan distribusi gaya dalam sistem pondasi, terutama pada kondisi pembebanan tidak simetris. Semakin besar eksentrisitas, semakin besar pula momen yang ditimbulkan, sehingga memengaruhi stabilitas dan desain struktur fondasi secara keseluruhan.

Tabel 4. Kontrol Beban Aksial Maksimum (Pola 3 Tiang Pancang dengan Pile Cap Segitiga)

D	Syarat	S	0.87 S	$X_1 = X_2$	$Y_1 = Y_2$	P_{Total}	n
(cm)	(2 – 3 D)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(ton)	
20	2.5 D	50	43.50	21.75	20	35.40	3

P_{Total} / n	M_y	$M_y \cdot (x)$	$\sum x^2$	$M_y \cdot (x) / \sum x^2$
	(ton · cm)	(ton · cm · cm)	(cm ²)	(ton)
11.80	0.35456	7.712	946.1	0.008

M_x	$M_x \cdot (y)$	$\sum y^2$	$M_x \cdot (y) / \sum y^2$	P_{Maks}	$Q_u \text{ (Grup)}$
(ton · cm)	(ton · cm · cm)	(cm ²)	(ton)	(ton)	(ton)
0.00133	0.03	400.0	0.000067	11.81	24.90

Nilai momen maksimum, kemudian dikonversi menjadi beban tambahan (ΔP), dijumlahkan dengan beban vertikal utama. Total beban maksimum hasil perhitungan adalah sebesar 11.81 ton, sementara daya dukung pondasi grup tiang ($Q_{u \text{ (Grup)}}$) adalah sebesar 24.90 ton. Karena nilai $P_{\text{Maks}} < Q_{u \text{ (Grup)}}$, maka sistem pondasi dinyatakan aman terhadap pengaruh gaya gesek negatif dan eksentrisitas beban. Hal ini, menunjukkan bahwa desain pondasi yang mempertimbangkan beban tambahan tetap mampu menjaga kestabilan struktur. Selain itu, perhitungan ini menjadi validasi bahwa eksentrisitas beban tidak menyebabkan distribusi beban yang melebihi kapasitas dukung tiang secara lokal.

Hasil analisis pada Tabel 4, menunjukkan bahwa gaya gesek negatif memberikan kontribusi tambahan terhadap beban aksial yang harus ditahan oleh pondasi tiang pancang. Meskipun demikian, kapasitas daya dukung ultimit (Q_u) tiang grup masih lebih besar, dibandingkan total beban struktur ditambah gaya gesek negatif, menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi stabil. Sebagai contoh, pada kondisi timbunan maksimum setinggi 3.5 meter, beban total yang dihitung sebesar 16.98 ton, sedangkan kapasitas daya dukung grup tiang mencapai 24.90 ton. Perbandingan ini, menghasilkan faktor keamanan yang masih memenuhi standar perencanaan pondasi dalam kondisi terburuk sekalipun.

Stabilitas pondasi terhadap beban struktur, juga diperkuat dengan evaluasi terhadap penurunan elastis yang terjadi. Hasil perhitungan, menunjukkan bahwa penurunan yang dialami pondasi masih berada di bawah ambang batas toleransi, yaitu kurang dari 25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi vertikal akibat gabungan beban struktur dan gaya gesek negatif tidak menyebabkan gangguan terhadap fungsi struktur di atasnya. Dengan demikian, pondasi tidak hanya mampu menahan beban secara statis, tetapi juga mempertahankan kestabilan geometris struktur secara menyeluruh.

Selain itu, distribusi momen akibat eksentrisitas beban, juga dianalisis untuk memastikan tidak terjadi ketidakseimbangan yang berlebihan pada sistem pondasi. Nilai momen lentur (M_x dan M_y) yang dihitung, menunjukkan bahwa pondasi masih berada dalam batas kapasitas terhadap beban lateral maupun torsi yang diakibatkan oleh eksentrisitas. Ini memperkuat kesimpulan, bahwa secara keseluruhan pondasi memiliki stabilitas yang baik terhadap beban struktur yang bekerja, baik secara vertikal maupun lateral. Oleh karena itu, dengan mempertimbangkan gaya gesek negatif sekalipun, pondasi yang dirancang tetap dapat menjamin kestabilan struktur di atasnya.

4. Kesimpulan

Penelitian ini, menunjukkan bahwa tinggi timbunan memiliki pengaruh signifikan terhadap besarnya gaya

gesek negatif pada tiang pancang, ditunjukkan melalui peningkatan nilai Q_{neg} , seiring bertambahnya beban vertikal akibat timbunan. Data CPT yang dianalisis, menunjukkan bahwa lapisan tanah lunak dengan nilai q_c rendah dan permeabilitas kecil, sangat rentan terhadap konsolidasi dan pembentukan friksi negatif. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa gaya gesek negatif terbesar terjadi pada ketinggian timbunan 3.5 meter, meskipun peningkatannya tidak bersifat linier. Temuan ini, menegaskan pentingnya mempertimbangkan pengaruh timbunan dalam perencanaan fondasi, terutama pada wilayah dengan kondisi tanah lunak yang dalam.

Selain itu, meskipun gaya gesek negatif menambah beban aksial pada pondasi, hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung pondasi grup dan tiang tunggal pada proyek ini, masih memenuhi kriteria keamanan. Penurunan elastis yang terjadi juga masih dalam batas toleransi, sehingga struktur tetap stabil terhadap beban vertikal maupun lateral. Oleh karena itu, fondasi tiang pancang yang direncanakan, dengan mempertimbangkan parameter lapangan, seperti hasil pengujian CPT dan kondisi tanah aktual yang mampu memberikan performa secara aman dan efisien, bahkan pada kondisi timbunan tinggi sekalipun.

Daftar Rujukan

- [1] A. Dwipurwanagara, H. Sudardja, P. A. M. Agung, M. F. R. Hasan, and A. W. Adinegara, "Perencanaan Pondasi Bored Pile Terhadap Gaya Aksial dan Lateral Berdasarkan Data SPT pada Proyek Depo Langsa Aceh," *Pros. Semin. Nas. Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 393–401, 2025. [Online]. Available: <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/snts/article/view/4989>
- [2] A. Martinez and K. O'Hara, "Skin Friction Directionality in Monotonically- and Cyclically-Loaded Bio-Inspired Piles in Sand," *Deep Found. Inst. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.37308/DFIjnl.20200831.222.
- [3] B. M. Das and N. Sivakugan, *Principles of Foundation Engineering*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [4] C. Bohn, A. Lopes dos Santos, and R. Frank, "Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests," *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 143, no. 1, Art. no. 04016081, 2017, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001579.
- [5] F. Valikhah, A. Eslami, and M. Veiskarami, "Load–Displacement Behavior of Driven Piles in Sand Using CPT-Based Stress and Strain Fields," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 12, pp. 1879–1893, 2019, doi: 10.1007/s40999-018-0388-7.
- [6] H. MolaAbasi, A. Khajeh, R. J. Chenari, and M. Payan, "A Framework to Predict the Load-Settlement Behavior of Shallow Foundations in a Range of Soils from Silty Clays to Sands Using CPT Records," *Soft Comput.*, vol. 26, no. 7, pp. 3545–3560, 2022, doi: 10.1007/s00500-021-06485-8.
- [7] J. E. Bowles and Y. Guo, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996.

- [8] J. H. Schmertmann, *Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design*, Rep. FHWA-TS-78-209. Washington, DC, USA: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Jul. 1978. [Online]. Available: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/958>
- [9] J. Wang, H.-H. Zhu, G.-X. Mei, T. Xiao, and Z.-Y. Liu, "Field Monitoring of Bearing Capacity Efficiency of Permeable Pipe Pile in Clayey Soil: A Comparative Study," *Measurement*, vol. 186, Art. no. 110151, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110151.
- [10] M. Amirmojahedi and M. Abu-Farsakh, "Evaluation of 18 Direct CPT Methods for Estimating the Ultimate Pile Capacity of Driven Piles," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2673, no. 9, pp. 127–141, 2019, doi: 10.1177/0361198119833365.
- [11] M. M. Hajitaheriha, F. Jafari, M. Hassanlourad, and A. Hasani Motlagh, "Investigating the Reliability of Negative Skin Friction on Composite Piles," *Civ. Eng. Infrastruct. J.*, vol. 54, no. 1, pp. 23–42, 2021, doi: 10.22059/cej.2020.287489.1607.
- [12] P. A. M. Agung, A. R. Hermawan, and I. K. Sucita, "A Modification of Pile Unit Skin (f) of Frictional Resistance (Q_s) on Clayey Layer at Central of Jakarta," in *Proc. 8th Annu. Southeast Asian Int. Semin. (ASAIS 2019)*, pp. 126–131, 2019, doi: 10.5220/0009954100002905.
- [13] P. A. M. Agung, L. Anggraini, A. W. Adinegara, Suropto, and M. F. R. Hasan, "Consolidation settlement analysis using preloading method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1563, no. 1, Art. no. 012031, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1563/1/012031.
- [14] P. A. M. Agung, M. F. R. Hasan, D. Yatmadi, A. Susilo, Sutikno, D. B. Osa, A. W. Adinegara, M. A. M. Razi, M. A. Ahmad, and A. Zainorabidin, "Stability Analysis of Dike Pond Due to Pore-Water Pressure Changes," *Civil Eng. J.*, vol. 11, no. 8, pp. 3395–3414, 2025, doi: 10.28991/CEJ-2025-011-08-017.
- [15] P. A. M. Agung, M. F. R. Hasan, M. A. Ahmad, N. Martina, and M. B. Saifullizan, "Prediction of Q_u and R_u Capacities of Pile in Clayey Soil Layer Using Geospatial Analysis," *GEOMATE J.*, vol. 23, no. 98, pp. 31–38, 2022, doi: 10.21660/2022.98.3062.
- [16] P. A. M. Agung, R. Sultan, M. Idris, A. T. Sudjianto, M. A. Ahmad, and M. F. R. Hasan, "Probabilistic of in Situ Seismic Soil Liquefaction Potential Based on CPT-Data in Central Jakarta, Indonesia," *Int. J. Sustain. Constr. Eng. and Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 241–248, 2023, doi: 10.30880/ijscet.2023.14.01.021.
- [17] P. A. M. Agung, M. A. Ahmad, and M. F. R. Hasan, "Probability Liquefaction On Silty Sand Layer On Central Jakarta," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 9, pp. 48–55, 2022, doi: 10.30880/ijie.2022.14.09.007.
- [18] P. A. M. Agung, Suropto, A. Salimah, D. Yatmadi, and M. F. R. Hasan, "Ground Movement Risk Analysis of Slope with Expansive Soil for Sustainable Infrastructure Development," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1462, no. 1, Art. no. 012028, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1462/1/012028.
- [19] R. Liang, Z.-Y. Yin, J.-H. Yin, and P.-C. Wu, "Numerical Analysis of Time-Dependent Negative Skin Friction on Pile in Soft Soils," *Comput. Geotech.*, vol. 155, Art. no. 105218, 2023, doi: 10.1016/j.compgeo.2022.105218.
- [20] S. Chalajour and J. A. Blatz, "Prediction of Drag Force on Piles Subjected to Negative Skin Friction Induced by Bridge Embankment Construction Based on Measured Field Data," *Transp. Geotech.*, vol. 51, Art. no. 101507, 2025, doi: 10.1016/j.trgeo.2025.101507.
- [21] Y. Atenov and I. Bekbasarov, "Equations Used to Calculate Vertical Bearing Capacity of Driven Piles with Shaft Broadenings," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 4, pp. 1235–1243, 2020, doi: 10.3311/PPci.16482.