



ANALISIS PENGARUH INTERAKSI TANAH TERHADAP STRUKTUR PONDASI *BORED PILE* MENGGUNAKAN SOFTWARE GEO5 PADA BANGUNAN JEMBATAN GANTUNG KACA BROMO

Muhammad Islam Darmawan B.¹, Laily Endah Fatmawati²

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya

*Email : islamdarmawan02@gmail.com, lailyendah@untag-sby.ac.id

Abstract

In bridge construction, there are two main components to consider: the superstructure and the substructure. The superstructure serves as the roadway for vehicles and pedestrians, utilizing elements such as beams, slabs, and girders designed to withstand traffic loads. On the other hand, the substructure consists of the foundation and piers, responsible for supporting and distributing the superstructure's load to the ground. In this context, the focus of this study is on the substructure, particularly the use of bored pile foundations. Due to the varying mechanical characteristics of the soil surrounding the foundation, careful analysis of the soil-structure interaction in bored pile foundations is crucial to ensure the safety and stability of the structure. This study utilizes the Geo5 geotechnical engineering software, which provides methods and algorithms to assess the interaction between soil and bored pile foundations. The software allows for the inclusion of soil parameters such as mechanical properties, bearing capacity, and deformation characteristics in the analysis model. By using Geo5, numerical simulations can be conducted to evaluate foundation performance, identify potential issues, and design optimal solutions to ensure the successful construction of a safe and robust bridge.

Keywords: *Substructure, Bored pile, Geo5*

ABSTRAK

Dalam pembangunan jembatan, terdapat dua bagian utama yang harus diperhatikan, yaitu superstruktur dan substruktur. Superstruktur berfungsi sebagai lintasan untuk kendaraan dan pejalan kaki, dengan menggunakan elemen seperti balok, pelat, dan girder yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas. Di sisi lain, Substruktur merupakan bagian bawah jembatan yang terdiri dari pondasi dan pilar, yang bertugas menopang dan mendistribusikan beban dari superstruktur ke tanah. Dalam konteks ini, fokus penelitian ini adalah pada substruktur, khususnya pada penggunaan pondasi *bored pile*. Karena tanah di sekitar pondasi dapat memiliki karakteristik mekanik yang berbeda, analisis yang cermat tentang pengaruh interaksi tanah terhadap pondasi *bored pile* sangat penting untuk memastikan keamanan dan stabilitas bangunan. Dalam penelitian ini, digunakan *software* rekayasa geoteknik Geo5 yang menyediakan metode dan algoritma untuk mengkaji pengaruh interaksi antara tanah dan pondasi *bored pile*. Software ini memungkinkan penggunaan parameter tanah, seperti sifat mekanik, kemampuan dukung, dan karakteristik deformasi tanah, dalam model analisis. Dengan menggunakan Geo5, dapat dilakukan simulasi numerik untuk mengevaluasi kinerja pondasi, mengidentifikasi potensi masalah, dan merancang solusi yang optimal untuk memastikan keberhasilan konstruksi jembatan yang aman dan kuat.

Kata kunci: Substruktur, Tiang Bor, Geo5

PENDAHULUAN

Dalam konstruksi jembatan, terdapat dua komponen utama yang memerlukan perhatian, yaitu "Superstruktur" dan "Substruktur". Superstruktur berfungsi sebagai bagian atas jembatan yang berperan sebagai jalur untuk kendaraan dan pejalan kaki. Ini melibatkan elemen seperti balok, pelat, dan girder yang dirancang untuk menahan beban yang berasal dari lalu lintas. Material yang sering digunakan meliputi beton, baja, atau kombinasi dari keduanya. Sementara itu, Substruktur adalah bagian bawah jembatan yang bertugas menopang dan mendistribusikan beban dari superstruktur ke tanah di bawahnya. Ini melibatkan elemen pondasi dan pilar. Pondasi, seperti tiang pancang, tiang bor, atau *pile cap*, berfungsi untuk menopang beban dan mentransfernya ke dalam tanah. Sedangkan pilar, yang umumnya terbuat dari beton atau baja, bertugas menahan beban dan menjaga kestabilan jembatan. Kedua komponen ini perlu bekerja secara harmonis guna memastikan kekuatan, kestabilan, dan keselamatan jembatan yang sedang dibangun.

Pada proyek pembangunan bangunan, tanah di sekitar pondasi dapat memiliki karakteristik mekanik yang beragam, seperti kekuatan, kepadatan, dan deformabilitas yang berbeda-beda. Interaksi antara pondasi dan tanah dapat menyebabkan perubahan dalam pemindahan beban, deformasi, dan tekanan pada tanah. Oleh karena itu, analisis yang teliti mengenai interaksi antara tanah dan struktur pondasi *bored pile* sangat penting untuk memastikan keamanan dan stabilitas bangunan.

Dalam melakukan analisis, penggunaan perangkat lunak khusus seperti GEO5 dapat menjadi sarana yang efektif. GEO5 adalah perangkat lunak rekayasa geoteknik yang diciptakan dengan tujuan untuk menganalisis berbagai aspek dalam perencanaan pondasi dan struktur geoteknik. Perangkat lunak ini menyediakan beragam metode dan algoritma yang dapat digunakan untuk mempelajari dampak interaksi antara tanah dan pondasi *bored pile*.

Dengan memanfaatkan perangkat lunak GEO5, dimungkinkan untuk menginput parameter-parameter tanah seperti karakteristik mekanik, kapasitas dukungan, dan sifat deformasi ke dalam model analisis. Perangkat lunak ini mengizinkan simulasi numerik yang mempertimbangkan variasi beban dan kondisi tanah yang mungkin terjadi pada pondasi *bored pile*. Keberadaan perangkat lunak ini membantu dalam mengevaluasi kinerja pondasi, mengidentifikasi potensi masalah, serta merancang solusi yang paling optimal untuk menghadapinya.

Melalui penelitian yang berjudul " Analisis Pengaruh Interaksi Tanah Terhadap Struktur Pondasi *Bored pile* Menggunakan Software Geo5 Pada Bangunan Jembatan Gantung Kaca Bromo ", akan diperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai respons tanah terhadap pondasi dan dampaknya terhadap stabilitas dan kekuatan struktur.

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam menganalisis pengaruh interaksi tanah terhadap struktur pondasi bored pile merupakan hal yang penting dalam merancang pondasi. Dalam analisis ini, juga mempertimbangkan bagaimana pengaruh beban struktur pada tanah dapat mempengaruhi kinerja pondasi. Teori ini sangat penting dalam merancang pondasi yang aman dan handal, sehingga dapat menghindari kerusakan pada struktur bangunan dan menjaga keamanan pengguna bangunan.

Penyelidikan Tanah

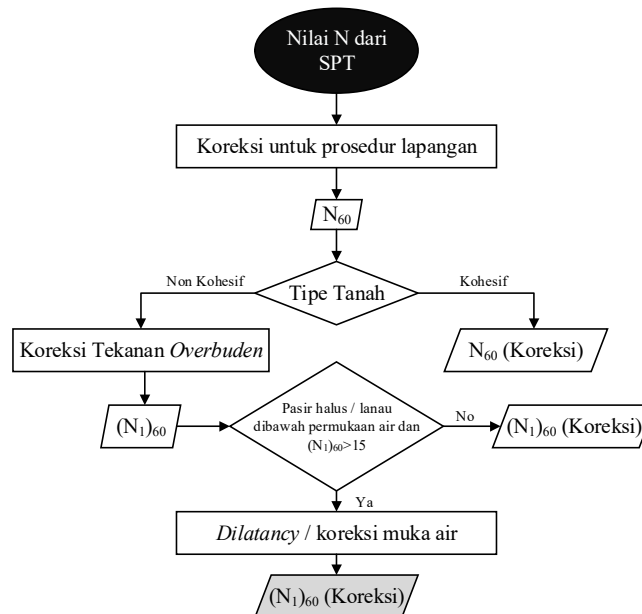
Penyelidikan Tanah atau yang juga dikenal sebagai Penelitian Tanah adalah sebuah proses untuk mengumpulkan informasi dan data mengenai sifat dan kondisi tanah pada suatu lokasi. Penyelidikan Tanah biasanya dilakukan untuk keperluan pengembangan lahan, konstruksi bangunan, pertanian, pengelolaan sumber daya alam, dan berbagai keperluan lainnya.

Uji Penetrasi Standar (SPT)

Metode uji geoteknik yang umum digunakan untuk penyelidikan tanah adalah Uji Penetrasi Standar (SPT), yang bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik tanah. Uji ini melibatkan pemboran lubang di tanah dan penggunaan alat uji SPT untuk mengukur kedalaman bor, jumlah pukulan yang diperlukan, serta resistensi geser tanah di sekitar lubang. Uji Penetrasi Standar merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan dalam analisis karakteristik tanah.

Koreksi Hasil Uji Penetrasi Standar (SPT)

Proses koreksi direpresentasikan dengan diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1 Flowchart koreksi nilai N-SPT
Sumber : (Peck et al., 1974; Rahman, 2019)

Variasi dalam prosedur pengujian setidaknya dapat dikompensasikan sebagian dengan mengubah nilai N terukur dilapangan menjadi N₆₀ sebagai berikut (Skempton, 1986).

$$N_{60} = \frac{E_H C_B C_S C_R N}{0.60} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

N₆₀ = Nilai N-SPT yang dikoreksi untuk prosedur lapangan

E_H = Efisiensi *hammer*/ palu (tabel 1)

C_B = Koreksi diameter lubang bor (tabel 1)

C_S = Koreksi sampler (tabel 1)

C_R = Koreksi Panjang batang (tabel 1)

N = Diukur dari Nilai N-SPT

Tabel 1 Tabel koreksi untuk prosedur lapangan dari nilai N-SPT

Efisiensi Tipe SPT <i>Hammer</i> (Coduto, 2001; BNBC 2015)		
Tipe <i>Hammer</i>	Mekanisme penumbukan	Efisiensi, E _H
<i>Automatic</i>	<i>Trip</i>	0,70
<i>Donut</i>	<i>Hand dropped</i>	0,60
<i>Donut</i>	<i>Cathead+2 turns</i>	0,50
<i>Safety</i>	<i>Cathead+2 turns</i>	0,55-0,60
<i>Drop/Pin</i>	<i>Hand dropped</i>	0,45
<i>Borhole, sampler and Rod Correction factors</i> (Coduto, 2001; BNBC 2015)		
Faktor	Variabel Alat	Faktor Koreksi
<i>Borehole Diameter Factor, C_B</i>	65 - 115 mm (2,5-4,5 in)	1,00
	150 mm (6 in)	1,05
	200 mm (8 in)	1,15
<i>Sampler Correction, C_S</i>	<i>Standard sampler</i>	1,00
	<i>Sampler without liner (not recommended)</i>	1,20
<i>Rod Length Correction, C_R</i>	3 - 4 m (10-13 ft)	0,75
	4 - 6 m (13-20 ft)	0,85
	6 - 10 m (20-30 ft)	0,95
	>10 m (>30 ft)	1,00

Sumber : (Rahman, 2019)

Pada tanah tanpa kohesif, tekanan lapisan penutup mempengaruhi resistensi penetrasi. Dengan demikian, semua nilai SPT hasil uji lapangan harus dikoreksi oleh faktor koreksi yang diberikan seperti formula dari (Peck dkk., 1974).

$$C_N = 0,77 \log \frac{2000}{\sigma'_0} \dots\dots\dots (2)$$

Kapasitas Daya Dukung Pondasi *Bored Pile* untuk Beban Aksial

1. Beban Aksial Tekan

Daya dukung pondasi tiang ditentukan berdasarkan hasil pengujian SPT, dengan rumus dasar:

$$Q_u = Q_b + Q_s - W_p \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{F} \dots\dots\dots (4)$$

Di mana:

- Q_u = Kapasitas daya dukung ultimit neto
- Q_b = Tahanan ujung bawah ultimit
- Q_s = Tahanan gesek ultimit
- Q_a = Kapasitas daya dukung izin tiang
- W_p = Berat sendiri tiang (kN)
- F = Faktor Aman (*Safety Factor*)

1) *End Bearing* (Q_b)

Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *end bearing*

$$Q_b = A_b \cdot f_p \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

- Q_b = Tahanan Ujung (kN)
- f_b = Unit tahanan ujung
- A_b = Luas dasar tiang bor

Untuk tanah kohesif (f_b) Reese dan O'Neill (1989) menyarankan persamaan berikut:

$$f_b = c_u N_c' \leq 4000 \text{ kPa} \dots\dots\dots (6)$$

$$N_c' = 6(1+0,2\frac{L}{d_b}) \leq 9 \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

- N_c' = Faktor kapasitas dukung
- c_u = Kohesi tak terdrainase (*undrained*) (kPa)
- L = Kedalaman ujung bawah tiang bor (m)
- d_b = Diameter ujung bawah tiang bor (m)

Nilai c_u (kohesi) bisa diambil dengan pendekatan (Hara et al., 1974) yaitu,

$$\frac{c_u}{P_a} = 0,29 N_{60}^{0,72} \text{ (kN/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (8)$$

Untuk tanah non-kohesif bisa mengikuti persamaan dari O'Neill dan Reese (1989) berikut ini:

$$f_b = 0,60\sigma_r N_{60} = 60 N_{60} \leq 4500 \text{ kPa} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana:

f_p = Tahanan ujung neto per satuan luas (kPa)

N_{60} = Nilai N-SPT rata-rata antara ujung bawah tiang bor sampai $2d_b$ di bawahnya.

d_b = Diameter ujung bawah tiang bor (m)

σ_r = Tegangan referensi = 100 kPa

2) *Skin Friction* (Q_s)

Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *skin friction*

$$Q_s = A_s f_s \dots\dots\dots (10)$$

Dimana:

Q_s = Tahanan Selimut (kN)

A_s = Luas selimut tiang (m^2)

f_s = Tahanan gesek per satuan luas (kN/m^2)

Untuk tanah kohesif, daya dukung selimut tiang ditentukan, berdasarkan rumus berikut ini:

$$f_s = \alpha c_u \text{ (syarat, } f_s \text{ maksimum 260 kPa)} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana:

f_s = Tahanan gesek per satuan luas (kN/m^2)

c_u = Kohesi tak terdrainase (*undrained*) (kN/m^2)

α = Faktor Adhesi

Tabel 2 Faktor adhesi untuk tiang bor pada tanah lempung

Kuat geser tak terdrainase, c_u (kPa)	Faktor adhesi (α)
< 200	0,55
200 - 300	0,49
300 - 400	0,42
400 - 500	0,38
500 - 600	0,35
600 - 700	0,33
700 - 800	0,32
800 - 900	0,31
> 900	Dihitung sebagai batu

Sumber : (AASHTO, 1998)

Untuk tanah non-kohesif maka persamaan yang digunakan berdasarkan rumus berikut ini:

$$f_s = \beta p_o' \text{ rata-rata} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana:

f_s = Tahanan gesek per satuan luas (kN/m^2)

p_o' = Tekanan *overburden* di tengah-tengah lapisan tanah (kN/m²)

Metode ini disebut juga dengan metode β . Koefisien β juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang disarankan oleh Reese dan O'Neill (1989):

Jika $N_{60} \leq 15$, maka β dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (13a):

$$\beta = \frac{N_{60}}{15} (1,5 - 0,245 \sqrt{z}) \dots\dots\dots (13a)$$

Jika $N_{60} > 15$, maka β dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (13b):

$$\beta = 1,5 - 0,245 \sqrt{z} \dots\dots\dots (13b)$$

Dimana:

Z = kedalaman di tengah-tengah lapisan tanah

2. Beban Aksial Tarik

$$Q_{tarik} = \sum q_s A_s + W_p \dots\dots\dots (14)$$

O'Neill dan Reese (1989) menyarankan untuk tiang tanpa pembesaran ujung, tahanan gesek tiang tarik di ambil 0,75 dari tiang tekan atau

$$q_{s(tarik)} = 0,75 q_{s(tekan)} \dots\dots\dots (15)$$

Rumus untuk menghitung berat sendiri tiang bored pile (W_p) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$W_p = (1/4 \pi d^2 L) \gamma_{beton} \dots\dots\dots (16)$$

Dimana:

W_p = Berat sendiri tiang bor

d^2 = Diameter *Bored Pile*

L = Panjang *Bored Pile*

γ_{beton} = Berat Volume Beton

Kapasitas Daya Dukung Pondasi *Bored Pile* untuk Beban Lateral

Pondasi bored pile memiliki kapasitas daya dukung untuk menahan beban lateral, seperti gaya angin, gempa bumi, atau tekanan tanah lateral. Sehubungan dengan hal tersebut, tiang-tiang dibedakan menjadi 2 tipe, yaitu:

- Tiang ujung jepit (*fixed end pile*)
- Tiang ujung bebas (*free end pile*)

1. Tahanan Beban Lateral Ultimit (Metode Broms)

1) Tiang Ujung Bebas (Kohesif)

Dengan menerapkan momen pada titik puncak momen pada tiang, hasil yang diinginkan dapat dicapai.

$$\begin{aligned} M_{mak} &= H_u (e + 3d/2 + f) - 1/2 f (9c_{ud} f) \dots\dots\dots (17) \\ &= H_u (e + 3d/2 + f) - 1/2 f H_u \\ &= H_u (e + 3d/2 + 1/2 f) \end{aligned}$$

Momen maksimum dapat pula dinyatakan oleh persamaan sebagai berikut:

$$M_{mak} = (9/4) d g^2 c_u \dots\dots\dots (18)$$

Dari keseimbangan gaya horizontal dapat diperoleh

$$f = H_u / (9c_u d) \dots\dots\dots (19)$$

2) Tiang Ujung Jepit (Kohesif)

Untuk tiang pendek, dapat dihitung tahanan tiang ultimit terhadap beban lateral:

$$H_u = 9c_u d (L-3d/2) \dots\dots\dots (20)$$

$$M_{mak} = H_u (L/2 + 3d/4) \dots\dots\dots (21)$$

Untuk tiang dengan panjang "sedang" di mana ujung atas tiang terjepit, persamaan (22) dapat digunakan untuk menghitung nilai M_y , dengan mengaplikasikan momen terhadap permukaan tanah.

$$M_y = (9/4) c_u d g^2 - 9 c_u d f (3d/2 + f/2) \dots\dots\dots (22)$$

Untuk tiang panjang ini, dapat menggunakan persamaan berikut ini:

$$H_u = \frac{2M_y}{3d/2+f/2} \dots\dots\dots (23)$$

3) Tiang Ujung Bebas (Non-Kohesif)

Tahanan ultimit (p_u) sama dengan 3 kali tekanan pasif. Dengan anggapan tersebut, distribusi tekanan tanah dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$p_u = 3 p_o' K_p \dots\dots\dots (24)$$

Dimana:

p_o = tekanan *overburden* efektif

$$K_p = (1 + \sin \varphi'') / (1 - \sin \varphi') = \text{tg}^2 (45^\circ + \varphi/2)$$

φ' = sudut gesek dalam efektif

$$H_u = \frac{(\frac{1}{2}) \gamma d L^3 K_p}{e+L} \dots\dots\dots (25)$$

Momen maksimum terjadi pada jarak f di bawah permukaan tanah dengan:

$$H_u = (3/2) \gamma d K_p f^2 \dots\dots\dots (26)$$

dan

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{H_u}{d K_p \gamma}} \dots\dots\dots (27)$$

Momen maksimum dinyatakan oleh persamaan:

$$M_{mak} = H_u (e + 2f/3) \dots\dots\dots (28)$$

4) Tiang Ujung Jepit (Non-Kohesif)

Beban lateral maksimum dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$H_u = (3/2) \gamma d L^2 K_p \dots\dots\dots (29)$$

Momen (negatif) yang terjadi pada kepala tiang, dihitung dengan persamaan:

$$M_{mak} = (2/3) H_u L = \gamma d L^3 K_p \dots\dots\dots (30)$$

Dengan mempertimbangkan keseimbangan horizontal pada tiang, kita dapat mendapatkan hasil sebagai berikut:

$$F = (3/2) \gamma d L^2 K_p - H_u \dots\dots\dots (31)$$

Dengan mengambil momen terhadap kepala tiang (pada permukaan tanah), dan dengan mensubstitusikan F pada persamaan (32), dapat diperoleh ($M_{mak} > M_y$):

$$M_y = (1/2) \gamma d L^3 K_p - H_u L \dots\dots\dots (32)$$

Persamaan (32) hanya berlaku jika momen maksimum pada kedalaman f lebih kecil dari nilai M_y , di mana jarak f dapat dihitung menggunakan persamaan (27). Nilai H_u dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$H_u = \frac{2M_y}{e + 2f/3} \dots\dots\dots (33)$$

2. Defleksi Tiang (Metode Broms)

1) Tiang dalam tanah kohesif

Defleksi tiang dalam tanah kohesif dapat dikaitkan dengan faktor tak berdimensi βL , yang merupakan ukuran dari pengaruh panjang tiang (L) pada defleksi.

$$\beta = \left(\frac{k_h d}{4E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (34)$$

Defleksi ujung tiang di permukaan tanah (y_o) diungkapkan melalui serangkaian persamaan yang bergantung pada jenis jepitan tiang yang digunakan. Berikut ini adalah persamaan-persamaan tersebut:

- Tiang ujung bebas untuk tiang pendek, bila $\beta L < 1,5$

$$y_o = \frac{4H(1+1,5e/L)}{k_h d L} \dots\dots\dots (35)$$

Rotasi tiang (θ):

$$\theta = \frac{12H(1+2e/L)}{k_h d L^2} \dots\dots\dots (36)$$

- Tiang ujung jepit untuk tiang pendek, bila $\beta L < 0,5$

$$y_o = \frac{H}{k_h d L} \dots\dots\dots (37)$$

dengan k_h koefisien reaksi *subgrade* horizontal.

- Tiang ujung bebas untuk tiang panjang, bila $\beta L > 2,5$

$$y_o = \frac{2H(e\beta+1)}{k_h d} \dots\dots\dots (38)$$

Rotasi tiang (θ):

$$\theta = \frac{2H\beta^2(1+2e\beta)}{k_h d} \dots\dots\dots (39)$$

- Tiang ujung jepit untuk tiang panjang, bila $\beta L > 1,5$

$$y_o = \frac{H\beta}{k_h d} \dots\dots\dots (40)$$

Dengan k_h sebagai koefisien reaksi subgrade untuk pembebanan horizontal dengan satuan kN/m², dapat menghitung besarnya gaya defleksi lateral pada tiang di permukaan tanah yang memiliki karakteristik kohesif.

2) Tiang dalam tanah non-kohesif

Defleksi tiang pada tanah non-kohesif, yang disebabkan oleh beban lateral, dapat dihubungkan dengan parameter tak berdimensi αL .

$$a = \left(\frac{n_h}{E_p I_p} \right)^{\frac{1}{5}} \dots\dots\dots (41)$$

- Tiang ujung bebas untuk tiang pendek, bila $\alpha L < 2$

$$y_o = \frac{18H(1+1,33e/L)}{L^2 n_h} \dots\dots\dots (42)$$

Rotasi tiang (θ):

$$\theta = \frac{24H(1+1,5e/L)}{L^3 n_h} \dots\dots\dots (43)$$

- Tiang ujung jepit untuk tiang pendek, bila $\alpha L < 2$

$$y_o = \frac{2H}{L^2 n_h} \dots\dots\dots (44)$$

- Tiang ujung bebas untuk tiang panjang, bila $\alpha L > 4$

$$y_o = \frac{2,4H}{(n_h)^{\frac{3}{5}}(E_p I_p)^{\frac{2}{5}}} + \frac{1,6He}{(n_h)^{\frac{2}{5}}(E_p I_p)^{\frac{3}{5}}} \dots\dots\dots (45)$$

Rotasi tiang (θ):

$$\theta = \frac{1,6H}{(n_h)^{\frac{2}{5}}(E_p I_p)^{\frac{3}{5}}} + \frac{1,74He}{(n_h)^{\frac{1}{5}}(E_p I_p)^{\frac{4}{5}}} \dots\dots\dots (46)$$

- Tiang ujung jepit untuk tiang panjang, bila $\alpha L > 4$

$$y_o = \frac{0,93H}{(n_h)^{\frac{3}{5}}(E_p I_p)^{\frac{2}{5}}} \dots\dots\dots (47)$$

3. Modulus reaksi *subgrade*

Untuk menganalisis perilaku tiang dengan menggunakan teori reaksi *subgrade*, penting untuk mengetahui variasi koefisien reaksi *subgrade* (k_h) sepanjang kedalaman tiang. Hingga saat ini, telah digunakan berbagai distribusi koefisien reaksi *subgrade* dalam penelitian dan praktek rekayasa.

$$k_h = k_L(z/L)^n \dots\dots\dots (48)$$

Dimana:

k_L = Nilai k_h pada ujung tiang ($z = L$ = kedalaman tiang)

n = Indeks empiris, dengan $n \geq 0$

Biasanya, nilai $n = 0$ digunakan untuk tanah lempung dengan modulus tanah konstan, sedangkan $n = 1$ untuk tanah granular dengan modulus tanah linier meningkat. Namun, Davisson dan Prakash (1963) merekomendasikan $n = 0,15$ untuk tanah lempung dalam kondisi undrained.

Untuk $n = 1$ (tanah granuler), maka k_h didefinisikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$k_h = n_h (z/d) \dots\dots\dots (49)$$

Dimana:

n_h = Koefisien reaksi *subgrade* (kN/m²)

z = Kedalaman dari permukaan tanah (m)

d = Diameter tiang (m)

Faktor Keamanan Tiang Bor (*Safety factor*)

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka kapasitas ultimit tiang bor dibagi dengan factor tertentu. Tomlinson (1977) menyarankan factor aman untuk tiang bor: Untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan diameter $d < 2$ m :

$$Q_a = \frac{Q_u}{2,5} \dots\dots\dots (50)$$

Untuk tiang tanpa pembesaran di bagian bawahnya :

$$Q_a = \frac{Q_u}{2} \dots\dots\dots (51)$$

Bila diameter tiang (*d*) lebih dari 2 m, kapasitas tiang ijin perlu dievaluasi dari pertimbangan penurunan tiang bor.

Kelompok Tiang

Salah satu dari persamaan-persamaan efisiensi tiang tersebut, yang disarankan oleh *Converse-Labarre formula*, sebagai berikut:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m+(m-1)n'}{90 m n'} \dots\dots\dots (52)$$

Dimana:

- E_g* = Efisiensi kelompok tiang
- m* = Jumlah baris tiang
- n'* = Jumlah tiang dalam 1 baris
- θ = arc tg *d/s*, dalam derajat
- s* = Jarak pusat tiang ke pusat tiang (m) (lihat gambar 2.13)
- d* = Diameter tiang (m)

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

$$Q_g = E_g n Q_u \dots\dots\dots (53)$$

Dimana:

- Q_g* = Kapasitas kelompok tiang
- E_g* = Efisiensi kelompok tiang
- n* = Jumlah tiang dalam kelompok
- Q_u* = Kapasitas daya dukung ultimit tiang tunggal

Distribusi Beban pada Tiang

Dalam situasi ini, distribusi beban yang merata terjadi di antara tiang-tiang, sehingga memastikan pembebanan yang seimbang dan meminimalkan risiko ketidakseimbangan struktural.

$$q = \frac{V}{m.n} \dots\dots\dots (54)$$

Dimana:

- q* = Beban yang dipikul oleh masing-masing tiang
- m* = Jumlah baris tiang di arah sb-x
- n* = Jumlah baris tiang di arah sb-y

Apabila kelompok tiang menerima beban yang eksentris, beban eksentris tersebut dapat dianggap sebagai kombinasi antara beban normal yang sentris dan momen.

Jika momen bekerja sepanjang sumbu X, maka momen $M = M_y = V \cdot x$. akibat beban normal yang sentris. Dalam kondisi ini, setiap tiang akan menerima beban yang sama dengan besaran sebesar itu.

Penurunan Tiang

1. Penurunan Tiang Tunggal

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \dots\dots\dots (55)$$

Dimana:

S = Penurunan total tiang

S_1 = Penurunan yang terjadi sepanjang tiang

S_2 = Penurunan tiang oleh beban yang bekerja pada ujung tiang

S_3 = Penurunan tiang oleh beban friksi sepanjang selimut tiang

$$S_1 = \frac{(Q_{wb} + \xi Q_{ws}) \cdot L}{A_b \cdot E_p} \dots\dots\dots (56)$$

Dimana:

Q_{wb} = Beban yang diterima pada ujung tiang

Q_{ws} = Beban yang diterima oleh tahanan friksi

A_b = Luas penampang tiang

L = Panjang tiang

E_p = Modulus young material tiang

ξ = Koefisien dari unit tahanan friksi

*Nilai ξ tergantung dari distribusi unit tahanan friksi sepanjang batang tiang (f). Apabila distribusi f seragam atau parabolic maka $\xi = 0,5$, dan untuk distribusi f yang membentuk segitiga nilai ξ sekitar 0,67 (Vesic, 1977)

Sementara itu, nilai modulus Young (E_p) untuk beton dapat diestimasi berdasarkan nilai kuat tekan beton (f_c') menggunakan suatu persamaan empiris seperti berikut:

$$E_p = 4700 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots (57)$$

$$S_2 = \frac{Q_{wb} \cdot C_p}{D \cdot q_b} \dots\dots\dots (58)$$

Dimana:

Q_{wb} = Beban yang diterima pada ujung tiang

C_p = Koefisien empiris

D = Lebar/Diameter tiang

q_b = Daya dukung batas ujung tiang

$$S_3 = \frac{Q_{wb} \cdot C_s}{L \cdot q_b} \dots\dots\dots (59)$$

Dimana:

Q_{wb} = Beban yang diterima pada ujung tiang

L = Panjang tiang

q_b = Daya dukung batas ujung tiang

C_s = Konstanta Empiris

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \cdot \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)} \right) \cdot C_p \dots\dots\dots (60)$$

Tabel 3 Koefisien empiris pada pondasi dalam (C_p)

Soil Type	Driven Pile	Bored Pile
Sand (dense to loose)	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Clay (stiff to soft)	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
Silt (dense to loose)	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

Sumber : (Zairipan Jaya & Reza, 2020)

2. Penurunan Kelompok Tiang

Vesic (1977) memberikan persamaan penurunan kelompok tiang yang sederhana, sebagai berikut:

$$S_{g(e)} = \sqrt{\frac{B_g}{D \cdot S}} \dots\dots\dots (60)$$

Dimana:

B_g = Lebar kelompok tiang

D = Diameter tiang tunggal

S = Penurunan tiang tunggal

3. Penurunan yang

$$S_{total} \leq S_{ijin} \dots\dots\dots (61)$$

$$S_{ijin} = 10\% \times D$$

Dimana:

D = Diameter tiang

Program Geo5

Geo5 Pile dan Geo5 Group merupakan perangkat lunak geoteknik yang dikembangkan oleh Fine Software dengan tujuan memberikan dukungan kepada insinyur geoteknik dalam melakukan perancangan dan analisis yang komprehensif terhadap pondasi tiang tunggal dan kelompok tiang pada proyek konstruksi. Dalam konteks ini, Geo5 Pile dan Geo5 Group dirancang secara khusus untuk menyediakan berbagai fitur dan algoritma yang dapat menghitung secara efisien kapasitas serta perilaku fondasi tiang.

Geo5 Pile merupakan salah satu komponen perangkat lunak Geo5 yang memiliki fokus dalam melakukan analisis dan desain terhadap pondasi tiang tunggal. Modul ini memungkinkan insinyur geoteknik untuk melakukan perhitungan yang teliti dan mendalam terkait kapasitas beban aksial, daya dukung pada ujung (end bearing), serta daya dukung pada gesekan (skin friction) pada pondasi tiang tunggal. Dengan menggunakan Geo5 Pile, pengguna dapat memilih dan menerapkan berbagai metode perhitungan yang akurat serta mempertimbangkan variasi kondisi tanah yang ada dalam proses analisis dan desain.

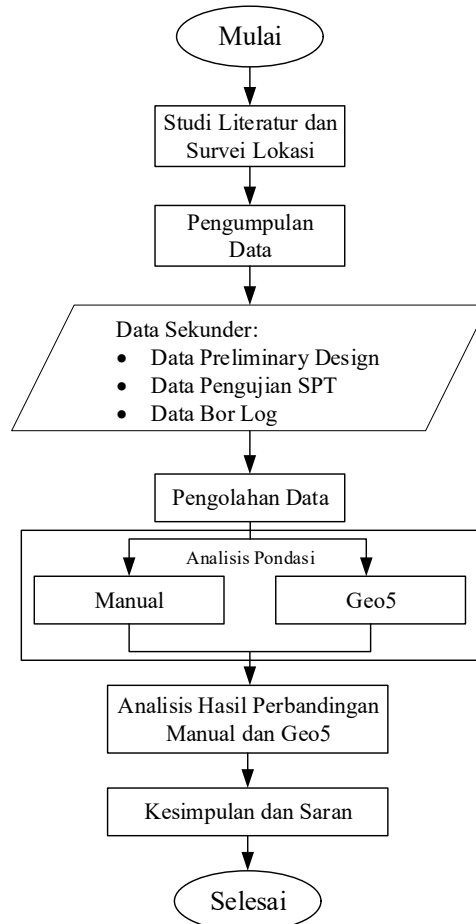
Di sisi lain, Geo5 Group adalah modul lain yang tersedia dalam perangkat lunak Geo5. Modul ini secara spesifik digunakan untuk melakukan analisis dan desain terhadap pondasi kelompok tiang. Dalam hal ini, Geo5 Group memungkinkan insinyur geoteknik untuk melakukan perhitungan yang cermat dan mempertimbangkan interaksi antara tiang-tiang dalam kelompok, mengoptimalkan konfigurasi kelompok tiang, serta mengevaluasi secara menyeluruh daya dukung total dan pembebanan pada tiang-tiang individu. Dengan beragam metode analisis

yang tersedia, Geo5 Group memberikan fleksibilitas dan ketepatan dalam merancang pondasi kelompok tiang yang efisien dan handal.

METODE PENELITIAN

Alur Metodologi Penelitian

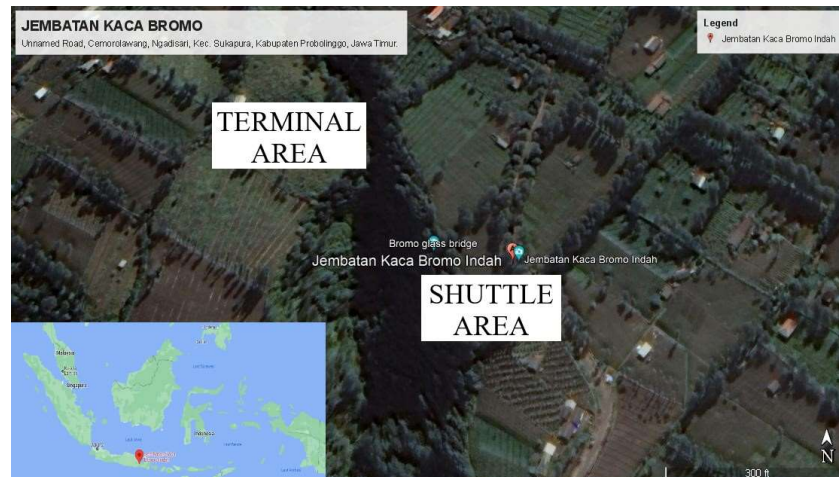
Adapun alur Metodologi penelitian ini akan di tampilkan dalam bentuk bagan alir yang dapat dilihat pada gambar 2 berikut ini:



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Studi Literatur dan Survei Lokasi

Studi literatur dimulai dengan mengumpulkan informasi teoritis melalui berbagai sumber referensi seperti artikel, jurnal, makalah, diktat, pedoman SNI, serta literatur lain yang relevan. Tujuan dari langkah ini adalah untuk memperoleh pemahaman yang mendalam tentang teori dasar dan parameter-parameter yang terkait dengan interaksi antara tanah dan struktur. Selain itu, dilakukan juga survei pada Proyek Penerapan Terbatas Jembatan Kaca di Bromo yang berlokasi di Kawasan Strategis Pariwisata Nasional (KSPN) Bromo-Tengger-Semeru Cemorolawang, Desa Ngadisari, Kecamatan Sukapura, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur. Melalui survei ini, data lapangan yang relevan dapat dikumpulkan untuk mendukung analisis lebih lanjut mengenai pembangunan Jembatan Gantung Kaca tersebut.



Gambar 3. Peta Lokasi Proyek Penerapan Terbatas Jembatan Kaca
Sumber : Google Maps, Terakhir Update Tahun 2020, Di akses Tahun 2022

Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini secara umum berasal dari sumber data sekunder yang diperoleh melalui kerjasama dengan Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur (BGTS) serta Kontraktor terkait. Data sekunder tersebut mencakup berbagai informasi yang menjadi fokus penelitian, seperti gambar perencanaan yang secara detail menggambarkan rancangan proyek, data perencanaan yang mencakup parameter teknis dan spesifikasi yang relevan, serta data hasil penyelidikan tanah di lokasi proyek yang memberikan pemahaman mendalam mengenai karakteristik geoteknik dan sifat tanah di area penelitian. Data tersebut memiliki peranan penting dalam mendukung analisis dan evaluasi yang dilakukan dalam penelitian ini.

Pengolahan Data

Setelah semua data yang diperlukan terkumpul secara komprehensif, langkah berikutnya adalah melakukan proses pengolahan data yang melibatkan analisis dan evaluasi. Tujuan dari pengolahan data ini adalah untuk menentukan parameter tanah dengan menggunakan data N-SPT yang terkumpul dan menerapkan korelasi empiris yang relevan. Melalui proses pengolahan data ini, diharapkan dapat diperoleh informasi yang akurat dan mewakili mengenai karakteristik geoteknik tanah di lokasi penelitian.

Analisis Pondasi

Setelah berhasil mendapatkan hasil parameter tanah yang diperlukan melalui proses pengolahan data dan analisis, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis pondasi. Analisis ini melibatkan dua pendekatan, yaitu perhitungan manual dan penggunaan program komputer Geo5, sesuai dengan metode yang dijelaskan dalam landasan teori di bab 2.

Dalam analisis manual, akan dilakukan perhitungan daya dukung pondasi untuk beban aksial dan lateral, serta penurunan pondasi dengan mempertimbangkan karakteristik tanah berdasarkan parameter tanah yang telah diperoleh sebelumnya.

Selain itu, akan digunakan program komputer Geo5 yang dapat memasukkan data parameter tanah yang telah diperoleh. Program ini memberikan perhitungan yang lebih akurat dan efisien berdasarkan metode-metode yang telah dipelajari sebelumnya.

Hasil dan Pembahasan

Setelah melewati serangkaian tahapan yang meliputi analisis data secara menyeluruh dan perhitungan yang komprehensif, penelitian ini akan menghasilkan berbagai temuan yang relevan dengan rumusan masalah yang telah diajukan. Dengan melakukan analisis yang mendalam, akan terungkap berbagai temuan, pola, dan hubungan antarvariabel yang akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang fenomena yang sedang diteliti. Melalui proses ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berarti dalam bidang studi yang relevan dan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap topik yang diteliti.

Kesimpulan dan Saran

Hasil dari penelitian ini akan memberikan kesimpulan yang signifikan, yang akan memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang topik penelitian yang relevan. Kesimpulan tersebut menjadi sumber informasi yang berharga, yang dapat digunakan sebagai landasan untuk pengambilan keputusan serta memberikan arah bagi penelitian lebih lanjut dalam bidang tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data Tanah Lapangan

Tabel 4 Data N-SPT Pada Titik BH-1 Area Terminal & Area Shuttle

TERMINAL		SHUTTLE	
KEDALAMAN (m)	N-SPT	KEDALAMAN (m)	N-SPT
0	0	0	0
2	5	1,5	17
3,5	13	3	25
5,5	20	4,5	17
7	36	6	17
8,5	13	7,5	19
10	50	9	37
11,5	23	10,5	15
13	48	12	29
14,5	13	13,5	46
16	24	15	38
17,5	50	16,5	60
19	47	18	30
20,5	32	19,5	58

Tabel 4 Data N-SPT Pada Titik BH-1 Area Terminal & Area Shuttle (Lanjutan)

TERMINAL		SHUTTLE	
KEDALAMAN (m)	N-SPT	KEDALAMAN (m)	N-SPT
22	36	21	63
23,5	35	22,5	55
25	45	24	54
26,5	37	25,5	30
28	39	27	36
29,5	45	28,5	56
31	35	30	44

Sumber : Hasil Pengeboran Di Lokasi Proyek (BH-1) Area Terminal & Area Shuttle

Koreksi N-SPT

1. Area Terminal

Diketahui : $E_H = 0,60$ (Tabel 2.2)

$C_B = 1$ (Tabel 2.2)

$C_S = 1$ (Tabel 2.2)

$C_R = 1$ (Tabel 2.2)

$N =$ Diukur dari Nilai N-SPT

$$\text{Maka : } N_{60} = \frac{E_H C_B C_S C_R N}{0,60}$$

$$N_{60} = \frac{E_H C_B C_S C_R N}{0,60} = \frac{0,60 \times 1,00 \times 1,00 \times 0,95 \times 50}{0,60} = 47,5 \rightarrow 48$$

Dikarenakan jenis tanah di area terminal tidak bersifat kohesif, sehingga perlu dilakukan koreksi tekanan *overburden*. Untuk melakukan koreksi tersebut, tekanan efektif lapisan atas dan berat jenis tanah harus diketahui. Berat jenis tanah rata-rata diasumsikan dari nilai N sebagai berikut:

$$\gamma_{moist} = 16,0 + 0,1 N_{60} \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\gamma_{moist} = 16,0 + 0,1 \times 48 = 20,8 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_0 = \gamma z = 20,8 \times 10 = 208 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u = 208 - 0 = 208 \text{ kN/m}^2$$

Dimana u adalah tekanan air pori. Di sini tidak ada permukaan air yang teramati pada kedalaman 10 m.

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60} \leq 2N_{60}$$

Di mana, $C_N =$ Faktor koreksi tekanan *overburden*

$$C_N = 0,77 \log \left(\frac{2000}{\sigma'_0} \right)$$

$$(N_1)_{60} = 0,77 \log \left(\frac{2000}{208} \right) \times 48 = 0,75 \times 48 = 36$$

Karena tanah tidak berada di bawah permukaan air dan $(N_1)_{60} < 15$ maka tidak perlu dilakukan koreksi dilantasi.

Tabel 5 Koreksi N-SPT Titik BH 1 Area Terminal

KEDALAMAN (m)	N-SPT	N ₆₀	(N ₁) ₆₀
0	0	0	0
2	5	4	5
3,5	13	10	12
5,5	20	17	17
7	36	34	31
8,5	13	12	10
10	50	48	36
11,5	23	23	17
13	48	48	32
14,5	13	13	9
16	24	24	15
17,5	50	50	29
19	47	47	25
20,5	32	32	17
22	36	36	18
23,5	35	35	17
25	45	45	21
26,5	37	37	17
28	39	39	17
29,5	45	45	18
31	35	35	14

Sumber : Perhitungan 2023

2. Area Shuttle

Diketahui : $E_H = 0,60$

$C_B = 1$

$C_S = 1$

$C_R = 1$

N = Diukur dari Nilai N-SPT

Maka : $N_{60} = \frac{E_H C_B C_S C_R N}{0,60}$

$$N_{60} = \frac{E_H C_B C_S C_R N}{0,60} = \frac{0,60 \times 1,00 \times 1,00 \times 0,95 \times 37}{0,60} = 35,2 \rightarrow 35$$

Dikarenakan jenis tanah di area terminal bersifat kohesif, sehingga tidak perlu dilakukan koreksi tekanan *overburden*.

Tabel 6 Koreksi N-SPT Titik BH 1 Area Shuttle

KEDALAMAN (m)	N-SPT	N ₆₀	(N ₁) ₆₀
0	0	0	0
2	17	13	18
3,5	25	19	-
5,5	17	14	-
7	17	16	-
8,5	19	18	-
10	37	35	-
11,5	15	15	-
13	29	29	-
14,5	46	46	-
16	38	38	-
17,5	60	60	-
19	30	30	-
20,5	58	58	-
22	63	63	-
23,5	55	55	-
25	54	54	-
26,5	30	30	-
28	36	36	-
29,5	56	56	-
31	44	44	-

Sumber : Perhitungan 2023

Rekapitulasi Analisis

Berikut adalah hasil rekapitulasi analisis perhitungan manual dan analisis menggunakan program Geo5 untuk beberapa parameter penting:

Tabel 7 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal dengan kedalaman 10 m

	Manual		Geo5	
	Terminal	Shuttle	Terminal	Shuttle
Q _b	1070,11 kN	1695,6 kN	891,43 kN	922,87 kN
Q _s	1986,09 kN	2412,3 kN	1127,75 kN	2108,8 kN
W _p	125,6 kN	125,6 kN	-	-
Q _u	2930,6 kN	3982,3 kN	2019,18 kN	3031,68 kN
Q_a	1465,3 kN	1991,15 kN	1009,59 kN	1515,84 kN
Q _{pull}	388,25	422,34 kN	-	-
S (Penurunan)	63,7 mm	64,19 mm	47,7 mm	580, 8 mm

Sumber : Hasil Perhitungan 2023

Tabel 8 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Lateral Tiang Tunggal dengan kedalaman 10 m

	Manual		Geo5	
	Terminal	Shuttle	Terminal	Shuttle
Kapasitas Lateral	15,63 kN	18,69 kN	212,56 kN	318,85 kN
Momen Maksimum	-	-	538,54 kNm	807,82 kNm
Pergesaran Maksimum	5,75 mm	2,187 mm	6,69 mm	7,5 mm

Sumber : Hasil Perhitungan 2023

Tabel 9 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Aksial Kelompok Tiang dan Efisiensi Kelompok Tiang pada struktur Blok Angkur

	Manual		Geo5	
	Terminal	Shuttle	Terminal	Shuttle
E_g	0,65	0,65	0,61	0,61
Q_g	38097,8 kN	51796,9 kN	24502,93 kN	36789,61 kN
$Q_{g(ijin)}$	19048,9 kN	25884,95 kN	12251,46 kN	18394,8 kN
S (penurunan)	13,71 mm	13,67 mm	18,6 mm	57,0 mm

Sumber : Hasil Perhitungan 2023

Tabel 10 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Aksial Kelompok Tiang dan Efisiensi Kelompok Tiang pada struktur Pilon

	Manual		Geo5	
	Terminal	Shuttle	Terminal	Shuttle
E_g	0,74	0,74	0,85	0,85
Q_g	13011,86 kN	17681,4 kN	10356,04 kN	15548,94 kN
$Q_{g(ijin)}$	6505,93 kN	8840,7 kN	5178,02 kN	7774,47 kN
S (penurunan)	12,79 mm	12,75 mm	17,8 mm	54,6 mm

Sumber : Hasil Perhitungan 2023

Tabel 11 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Lateral Kelompok Tiang menggunakan program Geo5

	Blok Angkur		Pilon	
	Terminal	Shuttle	Terminal	Shuttle
Kapasitas Lateral	50,41 kN	55,06 kN	121,11 kN	124,22 kN
Momen Maksimum	121,86 kNm	105,06 kNm	294,41 kNm	239,36 kNm

Pergesaran Maksimum	0,5 mm	0,7 mm	1,8 mm	1,6 mm
---------------------	--------	--------	--------	--------

Sumber : Hasil Perhitungan 2023

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan mengenai analisis pengaruh interaksi tanah terhadap pondasi bored pile pada pembangunan jembatan kaca bromo dapat ditarik kesimpulan :

- Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, hasilnya menunjukkan bahwa pondasi bored pile dalam bentuk kelompok, yang terdiri dari 20 tiang pada Blok Angkur dan 6 tiang pada Pilon, telah terbukti mampu menahan beban-beban yang bekerja dengan tingkat faktor keamanan yang memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Penggunaan faktor keamanan sebesar 2 untuk beban aksial dan 3 untuk beban lateral menunjukkan bahwa kapasitas pondasi tersebut cukup untuk menanggung beban-beban tersebut dengan tingkat keamanan yang memadai.
- Berdasarkan hasil perhitungan manual dan analisis menggunakan program Geo5, terdapat perbedaan pada beberapa parameter seperti daya dukung ujung, daya dukung gesekan, dan beban lateral. Kemungkinan perbedaan tersebut disebabkan oleh sedikit perbedaan dalam metode perhitungan antara kedua pendekatan tersebut. Meskipun demikian, perbedaan tersebut masih berada dalam rentang yang dapat diterima dan tidak memiliki dampak signifikan secara praktis. Oleh karena itu, baik analisis manual maupun analisis dengan menggunakan program Geo5 dapat diandalkan dalam melakukan evaluasi terhadap kinerja struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (1998). *LRFD bridge design specifications : customary U.S. Units, 2nd edn.* American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Coduto, D. P. (2001). *[E-Book] Foundation Design Principles and Practices 2nd Edition Donald P Coduto* (D. P. Coduto, Ed.; 2nd Edition). Prentice Hall.
- Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaka, S., & Banno, T. (1974). Shear Modulus and Shear Strength of Cohesive Soils. *Soils and Foundations*, 14(3).
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1974). *[E-Book] Foundation Engineering - 2nd Edition* (R. B. Peck, W. E. Hanson, & T. H. Thornburn, Eds.; 2nd Edition).
- Rahman, M. M. (2019). Foundation Design using Standard Penetration Test (SPT) N-value. *Researchgate*, 5, 1-39.
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3).
- Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations. *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, 42.
- Zairipan Jaya, S. T., & Reza, M. (2020). *Rekayasa Fondasi: untuk Program Vokasi.* Penerbit Andi.

