



Analisis Penurunan Pondasi Pancang Pada Bangunan Instalasi Pengolahan Air Kawasan Industri Terpadu Batang

Mohammad Haidar Ibnu Mas'ud¹, Adolf Situmorang², Hendra Masvika³

^{1,2,3} Universitas Semarang, Indonesia

DOI: 10.26623/teknika.v18i2.7773

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Disubmit : 2023-08-31

Direvisi : 2023-10-10

Disetujui : 2023-10-30

Keywords:

Kapasitas Dukung; Pondasi;

Pancang; Penurunan; Tiang

Tunggal; Tiang Kelompok;

Spun Pile

Abstrak

Pondasi merupakan elemen yang sangat penting dalam suatu bangunan. Namun, pondasi juga rentan mengalami penurunan. Penurunan pondasi dapat berdampak pada struktur utama bangunan. Pada dasarnya, penurunan pondasi terjadi ketika pondasi tersebut menanggung beban struktur di atasnya. Penurunan pondasi harus dipertimbangkan saat tahap perencanaan proyek konstruksi agar tidak melebihi batas izin yang telah ditetapkan. Tujuan dari penulisan ini adalah untuk mengidentifikasi kapasitas daya dukung pondasi dan pergerakan tanah yang terjadi. Jenis pondasi yang digunakan dalam Proyek Pembangunan Instalasi Pengolahan Air Kawasan Industri Terpadu Batang adalah pondasi pancang. Data dikumpulkan menggunakan data sekunder, termasuk gambar dan laporan investigasi tanah. Perhitungan beban pada struktur dilakukan dengan menggunakan program SAP2000, menghasilkan gaya aksial sebesar 5006,996 kN, gaya geser sebesar 4,979 kN, momen dalam arah X sebesar 72,7124 kN/m, dan momen dalam arah Y sebesar 322,0355 kN/m. Kapasitas daya dukung ultimit pondasi tiang tunggal adalah 4791,44 kN, sementara kapasitas daya dukung ultimit pondasi tiang kelompok adalah 5971,998 kN. Penurunan pondasi tiang tunggal dan tiang kelompok adalah 13,573 mm dan 30,350 mm, secara berturut-turut. Penurunan pondasi yang terjadi dianggap aman karena nilainya lebih rendah dari batas izin yang diizinkan.

Abstract

Foundations are a highly critical component of a building. However, foundations are also susceptible to settlement. Foundation settlement can have an impact on the primary structure of a building. Essentially, foundation settlement occurs when the foundation bears the load of the structure above it. Foundation settlement must be considered during the planning phase of a construction project to ensure it does not exceed the established limits. The purpose of this writing is to identify the foundation's load-bearing capacity and the soil movement that occurs. The type of foundation used in the Integrated Industrial Area Water Treatment Plant Construction Project in Batang is pile foundation. Data was collected using secondary data, including drawings and soil investigation reports. Load calculations on the structure were performed using the SAP2000 program, resulting in an axial force of 5006.996 kN, a shear force of 4.979 kN, a moment in the X direction of 72.7124 kN/m, and a moment in the Y direction of 322.0355 kN/m. The ultimate bearing capacity of a single pile foundation is 4791.44 kN, while the ultimate bearing capacity of a pile group is 5971.998 kN. The settlement of the single pile foundation and the pile group is 13.573 mm and 30.350 mm, respectively. The foundation settlement that occurred is considered safe because the values are below the allowable limits.

PENDAHULUAN

Pembangunan suatu konstruksi gedung diawali dengan adanya struktur bawah bangunan yang disebut pondasi (Ridar & Khatib, 2015). Berdasarkan penelitian Setiawan dan Rahayu (Satiawan & Raswitaningrum, 2020), faktor yang tidak kalah pentingnya untuk dipertimbangkan saat tahap perencanaan adalah perhitungan terhadap penurunan jangka pendek dan jangka panjang. Struktur bangunan ada 2 macam yaitu, struktur bawah dan struktur atas. Menurut Azizi (Azizi et al., 2022), struktur atas merupakan struktur bangunan yang ada di atas tanah, dan struktur bawah merupakan struktur bangunan yang ada di bawah tanah. Pondasi adalah salah satu elemen yang sangat penting dalam sebuah bangunan. Menurut Asperil (Yandi, 2017), pondasi merupakan bagian terdasar dalam konstruksi bangunan. Pondasi digunakan sebagai definisi suatu konstruksi bangunan yang berfungsi menopang bangunan dan menjadi penerus beban di atasnya ke lapisan tanah yang kuat daya dukungnya. Sebab itu, pondasi harus diperhitungkan agar menjamin stabilitas terhadap berat sendiri (Gazali et al., 2023).

Jenis pondasi ada berbagai macam, yaitu: pondasi tiang pancang, pondasi *bore pile*, dsb. Menurut Maha Agung, dkk, (Agung et al., 2018) pondasi yang pemasangannya dilakukan dengan cara mengebor tanah setelah itu diisi dengan tulangan yang dirangkai dan kemudian dicor merupakan pondasi *bore pile*. Sedangkan, pondasi menurut kedalamannya adalah pondasi dangkal dan pondasi dalam (Laksogo, 2019). Penurunan pondasi memiliki pengaruh pada konstruksi bangunannya, beberapa hal yang mempengaruhi diantaranya adanya erosi bawah tanah yang membawa butiran tanah, getaran pada tanah dan berakibat pada butiran tanah yang memadati ruang disekitarnya (Mahmudi, 2021).

Menurut Kusuma dan Mina (Mina & Kusuma, 2019), penurunan pondasi merupakan proses terjadinya penurunan suatu pondasi akibat beban struktur di atasnya. Cara menentukan daya dukung tiang tunggal adalah dengan melakukan perhitungan berdasarkan data penyelidikan tanah, data lapangan dan data hasil uji laboratorium (Fahriani & Apriyanti, 2015).

Muthmainnah, M (Muthmainnah, 2021) melakukan penelitian mengenai kapasitas dukung dan penurunan pondasi pancang menggunakan variasi dimensi yang menghasilkan besarnya penurunan pada pondasi sesuai dengan penurunan izin pada konstruksi tersebut. Daya dukung pondasi merupakan kemampuan pondasi dalam memikul tekanan atau beban yang diizinkan (Putri et al., 2018). Perbandingan antara daya dukung pondasi dan penurunan tanah dengan pemodelan skala laboratorium dengan pemodelan dengan bantuan program memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri (Nusantara, 2014). Dalam penelitian penurunan tentang penurunan pondasi dapat menggunakan program atau *software* untuk menghitung besar penurunan yang terjadi. Disamping itu, dengan adanya program geoteknik akan memudahkan dalam melakukan analisis pada pondasi yang akan ditinjau (Nugraha & Refanie, 2019).

Perbedaan dengan penelitian sebelumnya terletak pada variasi dalam metode perhitungan penurunan pondasi, jenis pondasi yang digunakan, dan perbedaan dalam karakteristik tanah di lokasi proyek. Dalam penelitian ini, perhitungan manual menggunakan metode Meyerhof akan digunakan, bersama dengan pembebanan dan pemodelan bangunan menggunakan program SAP 2000. Data yang diterapkan dalam penelitian ini melibatkan data sekunder, termasuk gambar dan informasi yang diperoleh dari investigasi tanah di area konstruksi proyek Instalasi Pengolahan Air Kawasan Industri Terpadu Batang.

Pada penelitian ini, Instalasi Pengolahan Air menjadi poin utama peninjauan penurunan pondasi tiang pancang yang terjadi pada bangunan tersebut. Instalasi Pengolahan Air merupakan bangunan pengolahan air yang terfokus pada Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM). Desain bangunan tersebut terdiri dari beberapa bangunan antara lain, bangunan bilik-bilik penampungan air, bilik sedimentasi air, bangunan rumah kimia, bangunan penampungan air serta jaringan perpipaan

untuk distribusi air. Lokasi pembangunan proyek konstruksi ini memiliki klasifikasi tanah yang beraneka ragam sehingga memungkinkan terjadinya penurunan pondasi.

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui besar kapasitas daya dukung tiang kelompok, kapasitas daya dukung ultimit tiang, penurunan pondasi tiang tunggal dan penurunan pondasi tiang kelompok yang terjadi pada bangunan Instalasi Pengolahan Air serta penurunan pondasi dapat memenuhi batas izin yang telah ditentukan.

METODE

Perhitungan manual menggunakan metode Meyerhof mencakup perhitungan daya dukung dan penurunan pondasi adalah sebagai berikut:

1. Tahanan Ujung Tiang

Diameter pancang yang digunakan adalah 50 cm

Perhitungan nilai rata-rata q_c 10D ke atas dapat dilihat pada Persamaan 1 berikut.

$$q_{c\ 10D} = \frac{(q_{c1}+q_{c2}+q_{c3}+q_{c4}+q_{c5})}{5} \quad [1]$$

Perhitungan nilai rata-rata q_c 4D ke atas dapat dilihat pada Persamaan 2 berikut.

$$q_{c\ 4D} = \frac{(q_{c1}+q_{c2})}{2} \quad [2]$$

Perhitungan nilai rata-rata q_c 10D ke atas dan 4D ke bawah dapat dilihat pada Persamaan 3 berikut.

$$\text{Total } q_c = \frac{(q_{c\ 10D}+q_{c\ 4D})}{2} \quad [3]$$

Perhitungan luas penampang tiang dapat dilihat pada Persamaan 4 berikut.

$$A_p = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \quad [4]$$

Perhitungan kapasitas daya dukung pada ujung tiang dapat dilihat pada Persamaan 5 berikut.

$$Q_p = q_c \times A_p \quad [5]$$

dimana :

q_c : daya dukung tanah (kg/cm²) berdasarkan data hasil penyelidikan tanah

A_p : luas penampang tiang (cm²)

Q_p : kapasitas daya dukung pada ujung tiang (kN)

2. Perhitungan Daya Dukung Selimut Pondasi

Nilai total hambatan lekat dapat dihitung dengan merujuk ke Persamaan 6 berikut.

$$JHL = l \times C \quad [6]$$

Nilai keliling tiang pondasi merujuk ke Persamaan 7 berikut.

$$K = \pi \times D \quad [7]$$

Nilai kapasitas daya dukung selimut merujuk ke Persamaan 8 berikut.

$$Q_s = JHL \times K \quad [8]$$

dimana :

l : kedalaman pondasi (cm)

C : nilai *clef* (kg/cm²)

D : diameter tiang (cm)

JHL : jumlah hambatan lekat (kg/cm)

Q_s : kapasitas daya dukung selimut (kN)

3. Daya Dukung Ultimit Tiang

Nilai perhitungan daya dukung ultimit tiang merujuk ke Persamaan 9 berikut.

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad [9]$$

dimana :

Q_p : kapasitas daya dukung pada ujung tiang (kN)

Q_s : kapasitas daya dukung selimut tiang (kN)

Q_{ult} : daya dukung ultimit tiang (kN)

4. Daya Dukung Izin Pondasi

Nilai perhitungan berat tiang pondasi merujuk ke Persamaan 10 berikut.

Berat jenis beton bertulang adalah 24 kN/m^3

$$W_p = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times BJ \times l \quad [10]$$

Nilai kapasitas daya dukung izin tiang merujuk ke Persamaan 11 berikut.

$$Q_{izin} = \left(\frac{Q_p}{SF} + \frac{Q_s}{SF} - W_p \right) \quad [11]$$

dimana :

W_p : berat tiang pondasi (kN)

Q_{izin} : kapasitas daya dukung izin tiang (kN)

D : diameter tiang (m)

BJ : berat jenis beton bertulang (kN/m^3)

l : kedalaman tiang (m)

5. Daya Dukung Kelompok Tiang

Banyaknya jumlah kelompok tiang merujuk ke Persamaan 12 berikut.

$$n = \frac{P}{Q_{izin}} \quad [12]$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D}{s} \right) \quad [13]$$

Nilai efisiensi kelompok tiang merujuk ke Persamaan 14 berikut.

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \quad [14]$$

Nilai daya dukung kelompok tiang merujuk ke Persamaan 15 berikut.

$$Q_g = n \times Q_{izin} \times E_g \quad [15]$$

dimana :

n : jumlah kelompok tiang

s : jarak pusat ke pusat tiang (m)

E_g : efisiensi kelompok tiang

Q_g : daya dukung kelompok tiang (kN)

6. Penurunan Pondasi Tiang Tunggal

Nilai modulus elastisitas tiang merujuk ke Persamaan 16 berikut.

$$E_p = 4700 \sqrt{fc'} \quad [16]$$

Nilai penurunan tiang tunggal merujuk ke Persamaan 17, 18, 19, 20 dan 21 berikut.

$$A_s = \pi \times D \times L \quad [17]$$

$$S_1 = \frac{(Q_p + \xi \cdot Q_s)L}{A_p \cdot E_p} \quad [18]$$

$$S_2 = \frac{(Q_p \cdot c_p)}{D \cdot q_p} \quad [19]$$

$$S_3 = \frac{Q_s}{A_s} \times \frac{D}{E_s} \times (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad [20]$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad [21]$$

Nilai penurunan pondasi yang diizinkan merujuk ke Persamaan 22 berikut.

$$S_{izin} = 10\% \times D \quad [22]$$

dimana :

E_p : modulus elastisitas tiang (kN/m^2)

A_s : luas permukaan tiang (m^2)

- S : nilai penurunan tiang (mm)
 S_{izin} : nilai penurunan tiang yang diizinkan
 E_s : nilai modulus elastisitas tanah (kN/m²)
 C_p : nilai koefisien empiris

Tabel nilai modulus elastisitas tanah dan nilai koefisien empiris dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut.

Tabel 1. Estimasi Nilai Modulus Elastisitas Tanah

Jenis Tanah	E_s (kN/m ²)
Lempung	
Sangat Lunak	300 – 3000
Lunak	2.000 – 4.000
Sedang	4.500 – 9.000
Keras	7.000 – 20.000
Berpasir	30.000 – 42.500
Pasir	
Berlanau	5.000 – 20.000
Tidak padat	10.000 – 25.000
Padat	50.000 – 100.000
Pasir dan Kerikil	
Padat	80.000 – 200.000
Tidak padat	50.000 – 140.000
Lanau	2.000 – 20.000
Loess	15.000 – 60.000

(Sumber: Bowles, 1989)

Tabel 2. Estimasi Nilai Koefisien Empiris

Tipe Tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
<i>Sand (Solid – Loose)</i>	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
<i>Clay (Stiff - Soft)</i>	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
<i>Silt (Solid - Loose)</i>	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

(Sumber: Vesic, 1977)

7. Penurunan Pondasi Tiang Kelompok

Nilai penurunan pondasi tiang kelompok merujuk ke Persamaan 23 berikut.

$$S_g = S \sqrt{\frac{b'}{D}} \quad [23]$$

dimana S_g adalah nilai penurunan tiang kelompok (mm)

8. Pembebanan Struktur untuk Pemodelan SAP2000

Beban Mati

Pada penelitian ini acuan pembebanan diambil dari PPURG 1987 (Umum, 1987). Perhitungan beban mati pada struktur bangunan Instalasi Pengolahan Air KITB menurut PPURG seperti Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Tabel Beban Mati

Lantai, fungsi/jenis	Tipe Beban	Berat Jenis	Tebal	Total	Satuan
<i>Screed</i> beton	Merata	21	0,02	0,42	kN/m ²

<i>Waterproofing</i>	Merata	13	0,01	0,01	kN/m ²
TOTAL				0,55	kN/m ²

(Sumber: Umum, 1987)

Beban Hidup

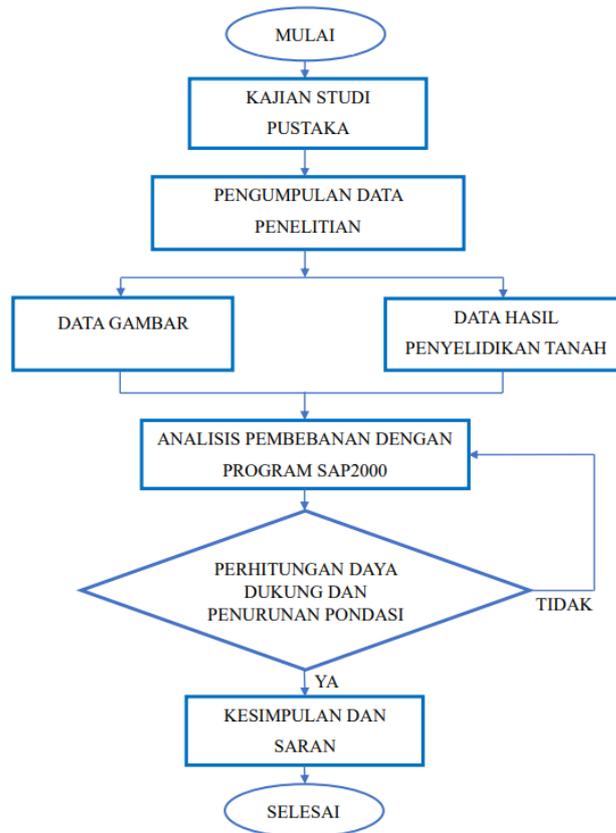
Beban hidup merujuk kepada beban yang timbul akibat aktivitas dan kehadiran pengguna serta penduduk dalam bangunan atau struktur, yang tidak termasuk beban yang berasal dari lingkungan seperti beban mati, hujan, angin, banjir, dan gempa sesuai dengan SNI 1727-2020 (Nasional, 2020). Berikut ini adalah nilai-nilai beban hidup yang harus dipatuhi sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1727-2020, seperti yang terdokumentasikan dalam Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Tabel Beban Hidup

Lantai, fungsi/jenis	Tipe beban	Berat Jenis	Dimensi			Total	Satuan
			P	L	T		
Beban Atap	Merata	-	-	-	-	0,96	kN/m ²
Beban Pelat Lantai SPAM	Merata	10	1	1	5,9	59	kN/m ²

(Sumber: Nasional, 2020)

Metode yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup survei dan analisis. Survei dilakukan di proyek untuk mengetahui lokasi titik pancang yang ditanamkan. Analisa yang dilakukan menggunakan hasil survei lapangan, data sekunder berupa data gambar dan data hasil penyelidikan tanah yang didapatkan dari proyek. Data yang diperoleh dari proyek digunakan sebagai dasar untuk melakukan pemodelan struktur dengan menggunakan aplikasi SAP2000, dengan tujuan untuk menghitung *axial force*, *shear force*, dan *moment* yang terjadi pada struktur tersebut. Setelah data didapatkan, dilakukan perhitungan penurunan pondasi dengan menggunakan metode Meyerhof secara manual. Gambar diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

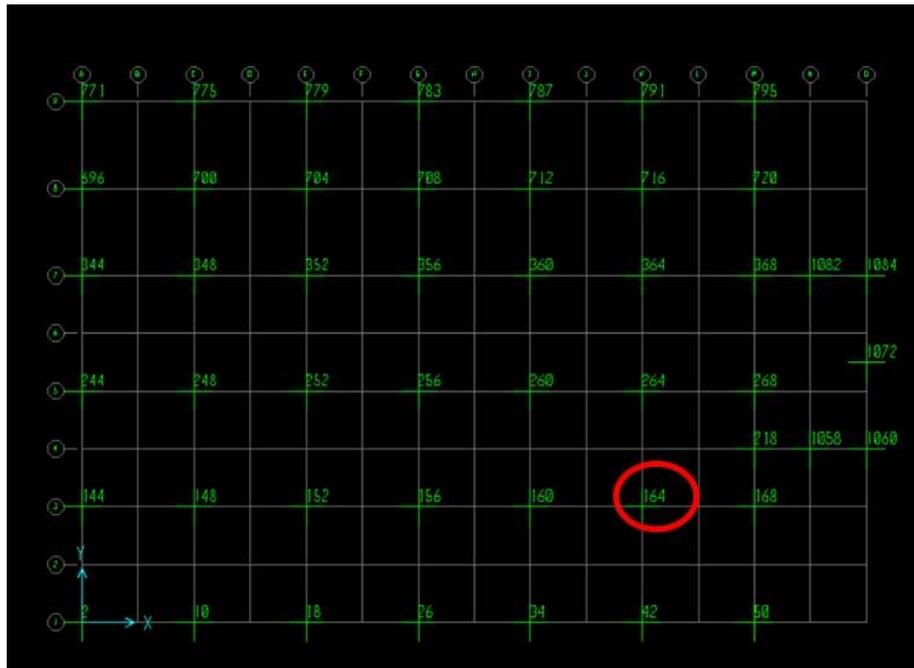
1. Hasil dari SAP2000

Keamanan pondasi dapat dikonfirmasi ketika dapat meneruskan beban dari struktur di atasnya ke tanah dasar tanpa menimbulkan kerusakan pada lapisan tanah di bawahnya. Beban tersebut mencakup *axial force*, *shear force* dan *moment*. Hasil perhitungan beban dari perangkat lunak SAP2000 dapat ditemukan dalam Tabel 5 berikut ini.

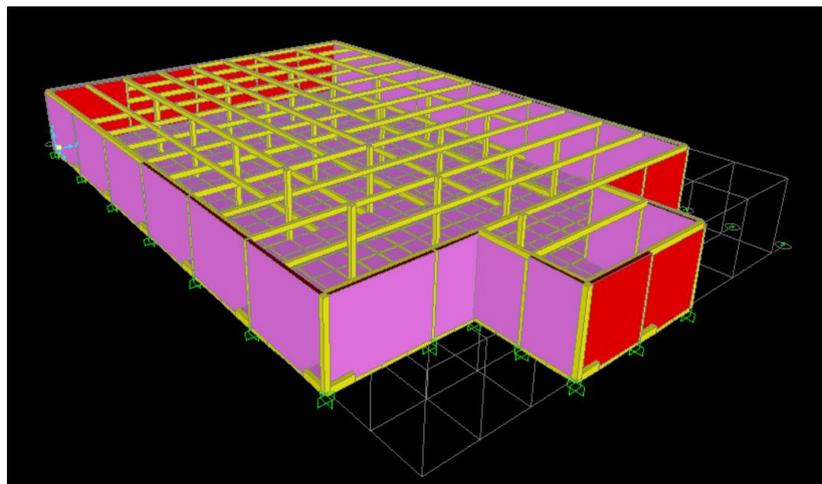
Tabel 5. Hasil *Output* Pembebanan Progam SAP2000

Nama Gaya	Nilai	Satuan
<i>Axial force</i> (P)	5006,996	kN
<i>Shear Force</i>	4,979	kN
<i>Moment X</i> (Mx)	72,7124	kN/m
<i>Moment Y</i> (My)	322,0355	kN/m

Joint yang ditinjau pada penelitian ini adalah *Joint* 164 yang memiliki nilai gaya aksial terbesar. Gambar *joint* yang ditinjau dan pemodelan bangunan dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3 berikut.



Gambar 2. Joint yang ditinjau



Gambar 3. Modelling struktur atas bangunan

2. Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Pondasi dengan Metode Meyerhof

Menggunakan tiang pancang diameter 50 cm dan $l = 17,40$ m menurut data sondir. Data sondir yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Data Sondir Proyek

Depth (m)	Q_c kg/cm ²	$Q_c + F$ kg/cm ²	LF kg/cm ²	FR %	TF kg/cm	Depth (m)	Q_c kg/cm ²	$Q_c + F$ kg/cm ²	LF kg/cm ²	FR %	TF kg/cm
0,00	0	0	0	0	0	10,20	38	40	0.2	0.53	190
0,20	4	6	0.2	5.00	4	10,40	39	41	0.2	0.51	194
0,40	5	7	0.2	4.00	8	10,60	38	40	0.2	0.53	198

Depth	Q _c	Q _c + F	LF	FR	TF	Depth	Q _c	Q _c + F	LF	FR	TF
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kg/cm	(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kg/cm
0,60	5	6	0.1	2.00	10	10,80	39	42	0.3	0.77	204
0,80	6	8	0.2	3.33	14	11,00	42	44	0.2	0.48	208
1,00	6	8	0.2	3.33	18	11,20	44	45	0.1	0.23	210
1,20	7	9	0.2	2.86	22	11,40	45	47	0.2	0.44	214
1,40	7	9	0.2	2.86	26	11,60	46	48	0.2	0.43	218
1,60	7	8	0.1	1.43	28	11,80	48	50	0.2	0.42	222
1,80	7	9	0.2	2.86	32	12,00	57	59	0.2	0.35	226
2,00	9	11	0.2	2.22	36	12,20	57	59	0.2	0.35	230
2,20	8	10	0.2	2.50	40	12,40	56	58	0.2	0.36	234
2,40	7	9	0.2	2.86	44	12,60	58	61	0.3	0.52	240
2,60	8	9	0.1	1.25	46	12,80	58	60	0.2	0.34	244
2,80	9	11	0.2	2.22	50	13,00	71	74	0.3	0.42	250
3,00	8	10	0.2	2.50	54	13,20	70	73	0.3	0.43	256
3,20	9	11	0.2	2.22	58	13,40	72	75	0.3	0.42	262
3,40	10	12	0.2	2.00	62	13,60	74	76	0.2	0.27	266
3,60	10	12	0.2	2.00	66	13,80	73	75	0.2	0.27	270
3,80	11	12	0.1	0.91	68	14,00	82	85	0.3	0.37	276
4,00	13	15	0.2	1.54	72	14,20	83	85	0.2	0.24	280
4,20	13	15	0.2	1.54	76	14,40	82	84	0.2	0.24	284
4,40	14	16	0.2	1.43	80	14,60	84	87	0.3	0.36	290
4,60	15	16	0.1	0.67	82	14,80	84	86	0.2	0.24	294
4,80	17	19	0.2	1.18	86	15,00	98	101	0.3	0.31	300
5,00	15	17	0.2	1.33	90	15,20	99	101	0.2	0.20	304
5,20	15	16	0.1	0.67	92	15,40	102	105	0.3	0.29	310
5,40	17	19	0.2	1.18	96	15,60	104	106	0.2	0.19	314
5,60	20	22	0.2	1.00	100	15,80	104	106	0.2	0.19	318
5,80	19	21	0.2	1.05	104	16,00	108	110	0.2	0.19	322
6,00	18	19	0.1	0.56	106	16,20	112	114	0.2	0.18	326
6,20	19	21	0.2	1.05	110	16,40	114	116	0.2	0.18	330
6,40	21	23	0.2	0.95	114	16,60	114	116	0.2	0.18	334
6,60	20	22	0.2	1.00	118	16,80	113	115	0.2	0.18	338
6,80	21	23	0.2	0.95	122	17,00	158	160	0.2	0.13	342
7,00	24	26	0.2	0.83	126	17,20	158	161	0.3	0.19	348
7,20	25	27	0.2	0.80	130	17,40	174	177	0.3	0.17	354
7,40	25	26	0.1	0.40	132	17,60	196	199	0.3	0.15	360
7,60	25	26	0.1	0.40	134	17,80	205	209	0.4	0.20	368

Depth	Q _c	Q _c + F	LF	FR	TF	Depth	Q _c	Q _c + F	LF	FR	TF
(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kg/cm	(m)	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kg/cm
7,80	26	29	0.3	1.15	140	18,00	245	248	0.3	0.12	374
8,00	27	29	0.2	0.74	144	18,20	<i>End of Sondir</i>				
8,20	28	30	0.2	0.71	148	18,40					
8,40	27	29	0.2	0.74	152	18,60					
8,60	29	31	0.2	0.69	156	18,80					
8,80	29	32	0.3	1.03	162	19,00					
9,00	32	34	0.2	0.63	166	19,20					
9,20	33	35	0.2	0.61	170	19,40					
9,40	35	37	0.2	0.57	174	19,60					
9,60	35	36	0.1	0.29	176	19,80					
9,80	34	36	0.2	0.59	180	20,00					
10,00	37	40	0.3	0.81	186	10,20					

(Sumber: Laporan Hasil Penyelidikan Tanah IPA KITB)

A. Tahanan Ujung Tiang (Q_p)

Dengan menerapkan Persamaan 1, 2, dan 3, kita dapat menghitung nilai rata-rata konus pada kedalaman 18 meter → 10D ke atas dan 4D kebawah adalah,

$$q_{c \text{ rata-rata}} = \frac{(205+196+174+158+158)}{5} = \frac{891}{5} = 178,2 \text{ kg/cm}^2 \text{ (nilai rata-rata } q_c \text{ 10D ke atas)}$$

$$q_{c \text{ rata-rata}} = \frac{(250+255)}{2} = 252,5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (nilai rata-rata } q_c \text{ 4D ke bawah)}$$

$$\text{Total } q_c = \frac{(178,2+252,5)}{2} = 215,35 \text{ kg/cm}^2$$

Dengan menggunakan Persamaan 4 maka luas penampang tiang adalah

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 50^2 \text{ cm} \\ &= 1962,5 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

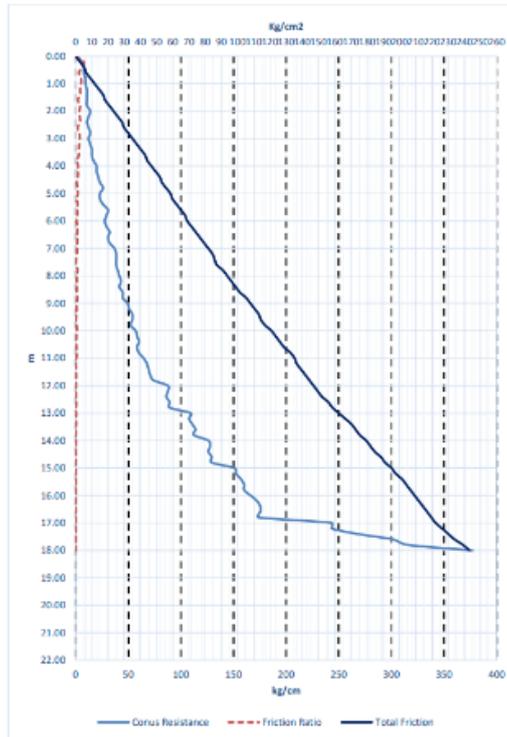
Dengan menggunakan kapasitas dukung pada ujung tiang adalah

$$\begin{aligned} Q_p &= q_c \times A_p \\ &= 215,35 \text{ kg/cm}^2 \times 1962,5 \text{ cm}^2 \\ &= 422624,4 \text{ kg} \rightarrow 4226,24 \text{ kN} \end{aligned}$$

B. Perhitungan Daya Dukung Selimut Pondasi (Q_s)

Jumlah Hambatan Lekat (JHL)

Gambar grafik hasil uji sondir dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Grafik hasil uji sondir
 (Sumber: Laporan Hasil Penyelidikan Tanah IPA KITB)

Dari grafik yang didapatkan maka nilai $C_{ef0-18\text{ m}}$ adalah

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{(370-0)}{1800} \\
 &= 0,20 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 6 maka nilai JHL adalah

$$\begin{aligned} \text{JHL} &= l \times C \\ &= 1800 \text{ cm} \times 0,20 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 360 \text{ kg/cm} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 7 maka keliling tiang pondasi adalah

$$\begin{aligned} K &= \pi \times D \\ &= \pi \times 50 \text{ cm} \\ &= 157 \text{ cm} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 8 maka nilai kapasitas daya dukung selimut adalah

$$\begin{aligned} Q_s &= \text{JHL} \times K \\ &= 360 \text{ kg/cm} \times 157 \text{ cm} \\ &= 56520 \text{ kg} \rightarrow 565,20 \text{ kN} \end{aligned}$$

C. Daya Dukung Ultimit Tiang (Q_{ult})

Dengan menerapkan Persamaan 9, kita dapat menghitung nilai daya dukung ultimate dari tiang adalah

$$\begin{aligned} Q_{ult} &= Q_p + Q_s \\ &= 4226,24 \text{ kN} + 565,20 \text{ kN} \\ &= 4791,44 \text{ kN} \end{aligned}$$

D. Daya Dukung Izin Pondasi (Q_{izin})

Dengan menggunakan Persamaan 10 maka berat tiang pondasi adalah

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times BJ \times l \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,5^2 \text{ m} \times 24 \text{ kg/m}^3 \times 18 \text{ m} \\ &= 84,78 \text{ kN} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 11 maka nilai kapasitas daya dukung izin tiang adalah

$$\begin{aligned} Q_{izin} &= \left(\frac{Q_p}{SF} + \frac{Q_s}{SF} - W_p \right) \\ &= \left(\frac{4226,26 \text{ kN}}{2,5} + \frac{565,20 \text{ kN}}{3} - 84,78 \text{ kN} \right) \\ &= 1794,124 \text{ kN} \end{aligned}$$

E. Daya Dukung Kelompok Tiang (Q_g)

Dengan menggunakan Persamaan 12 maka jumlah kelompok tiang adalah

$$\begin{aligned} n &= \frac{P}{Q_{izin}} \\ &= \frac{5006,996 \text{ kN}}{1794,124 \text{ kN}} \\ &= 2,79 \rightarrow \text{diambil 4 buah} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{D}{s} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{0,5 \text{ m}}{1,25 \text{ m}} \right) \\ &= 21,8014^\circ \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 14 maka nilai efisiensi kelompok tiang adalah

$$\begin{aligned} E_g &= 1 - \theta \frac{(n'-1)m+(m-1)n'}{90mn'} \\ &= 1 - \left[21,8014^\circ \left(\frac{(2-1)^2+(2-1)^2}{90 \cdot 2 \cdot 2} \right) \right] \\ &= 0,757762 \rightarrow 75,78\% \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 15 maka nilai daya dukung kelompok tiang adalah

$$\begin{aligned} Q_g &= n \times Q_{izin} \times E_g \\ &= 4 \times 1970,275 \text{ kN} \times 0,757762 \\ &= 5971,998 \text{ kN} \end{aligned}$$

F. Penurunan Pondasi Tiang Tunggal (S)

Setelah memperoleh nilai tahanan ujung tiang (Q_p), daya dukung selimut pondasi (Q_s), daya dukung ultimum tiang (Q_{ult}), daya dukung izin pondasi (Q_{izin}), dan daya dukung kelompok tiang (Q_g), langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan mengenai penurunan pondasi yang terjadi. Berikut ini adalah perincian perhitungan penurunan pondasi. Dengan menggunakan Persamaan 16 maka nilai modulus elastisitas tiang adalah

$$\begin{aligned} E_p &= 4700 \sqrt{f c'} \\ &= 4700 \sqrt{50} \\ &= 33234,019 \text{ MPa} \rightarrow 33234019 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 17, 18, 19, 20, dan 21 maka nilai penurunan tiang tunggal adalah

$$\begin{aligned} A_s &= \pi \times D \times L \\ &= \pi \times 0,5 \text{ m} \times 18 \text{ m} = 28,26 \text{ m}^2 \\ S_1 &= \frac{(Q_p + \xi \cdot Q_s)L}{A_p \cdot E_p} \\ &= \frac{(4226,24 \text{ kN} + 0,67 \cdot 565,20 \text{ kN})18 \text{ m}}{0,19625 \text{ m}^2 \cdot 33234019 \text{ kN/m}^2} \\ &= 0,012709 \text{ m} \\ S_2 &= \frac{(Q_p \cdot c_p)}{D \cdot q_p} \\ &= \frac{(4226,24 \text{ kN} \cdot 0,03)}{0,5 \text{ m} \cdot 21535} \\ &= 0,000118 \text{ m} \\ S_3 &= \frac{Q_s}{A_s} \times \frac{D}{E_s} \times (1 - \mu_s^2) I_{ws} \\ &= \frac{565,20 \text{ kN}}{28,26 \text{ m}^2} \times \frac{0,5 \text{ m}}{50000 \text{ kN/m}^2} \times (1 - 0,3^2) \left(2 + 0,35 \sqrt{\frac{18}{0,5}} \right) \\ &= 0,000746 \text{ m} \\ S &= S_1 + S_2 + S_3 \\ &= 0,012709 \text{ m} + 0,000118 \text{ m} + 0,000746 \text{ m} \\ &= 0,013573 \text{ m} \rightarrow 13,573 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan Persamaan 22 maka batas penurunan yang diizinkan adalah

$$\begin{aligned} S_{izin} &= 10\% \times D \\ &= 10\% \times 0,5 \text{ m} \\ &= 0,05 \text{ m} \end{aligned}$$

Dikutip dari penelitian terdahulu, besarnya penurunan pondasi tiang tunggal yang terjadi dapat dikatakan aman apabila sebagai berikut.

$$S < S_{izin} = 0,13573 \text{ m} < 0,05 \text{ m}$$

Jika besarnya penurunan pondasi lebih dari penurunan yang diizinkan maka pondasi tersebut tidak dapat menahan beban struktur di atasnya (Luthfiani et al., 2017). Dikarenakan besar $S < S_{izin}$ maka penurunan pondasi tiang tunggal yang terjadi **AMAN**.

G. Penurunan Pondasi Tiang Kelompok (S_g)

$$\begin{aligned} S_g &= S \sqrt{\frac{b'}{D}} \\ &= 0,13573 \text{ m} \sqrt{\frac{2,5}{0,5 \text{ m}}} \\ &= 0,03035 \text{ m} \rightarrow 30,35 \text{ mm} \end{aligned}$$

Besarnya penurunan pondasi tiang tunggal yang terjadi dapat dikatakan aman apabila

$$S < S_{izin} = 0,03035 \text{ m} < 0,05 \text{ m}$$

Dikarenakan besar $S_g < S_{izin}$ maka penurunan pondasi tiang kelompok yang terjadi aman.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, dapat disimpulkan bahwa pembebanan struktur bangunan Instalasi Pengolahan Air Kawasan Industri Terpadu Batang menggunakan program SAP2000 menghasilkan nilai-nilai berikut: *Axial force* sebesar 5006,996 kN, *Shear force* sebesar 4,979 kN, *Moment X* sebesar 74,7124 kN/m, dan *Moment Y* sebesar 322,0355 kN/m. Kapasitas daya dukung ultimit tiang pancang dan tiang kelompok adalah 4791,44 kN dan 5971,998 kN masing-masing. Penurunan pondasi pada tiang tunggal adalah 13,573 mm, sementara pada tiang kelompok adalah 30,350 mm. Dari hasil perhitungan ini, dapat disimpulkan bahwa penurunan pondasi yang terjadi pada bangunan Instalasi Pengolahan Air Kawasan Industri Terpadu Batang dapat dianggap aman, karena nilai penurunannya (S dan S_g) lebih kecil dari batas izin (S_{izin}), yaitu $0,13573 \text{ m} < 0,05 \text{ m}$ dan $0,03035 \text{ m} < 0,05 \text{ m}$.

DAFTAR PUSTAKA

Agung, P. A. M., Djuwari, K. W., & Andanawarih, M. F. (2018). Tinjauan Ulang Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Bored Pile pada Pembangunan Jalan Layang Kapt. Tendea - Blok M - Cileduk, Paket Santa Section P10 - P11. *Jurnal Poli-Teknologi*, 16(1).

Azizi, A., Al Fathoni, M. A. S., & Anjarwati, S. (2022). Analisis Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Metode Empiris dan Uji Beban pada Proyek Gedung "K" Universitas Muhammadiyah Purwokerto. *CIVeng: Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 3(1).

Bowles, J. E. (1989). Sifat-sifat fisis dan Geoteknis Tanah. *Erlangga. Jakarta*.

Fahriani, F., & Apriyanti, Y. (2015). Analisis Daya Dukung Tanah dan Penurunan Pondasi Pada Daerah Pesisir Pantai Utara Kabupaten Bangka. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 3(2), 89–95.

Gazali, A., Adawiyah, R., Nordina, H., & Surya, A. (2023). Studi Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Mini Pile pada Pembangunan Gedung Kantor Dinas Satuan Polisi Pamong Praja Kabupaten Tapin. *Jurnal Kacapuri: Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 6(1), 100–113.

- Laksogo, P. (2019). *Analisa Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Bored Pile pada Proyek Rumah Susun Sewa Universitas Islam Sultan Agung Semarang*. Universitas Islam Sultan Agung.
- Luthfiani, F., Nurhuda, I., & Atmanto, I. D. (2017). Analisis Penurunan Bangunan Pondasi Tiang Pancang dan Rakit pada Proyek Pembangunan Apartemen Surabaya Central Business District. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 6(2), 166–179.
- Mahmudi, A. (2021). Pengaruh Penurunan Pondasi Tiang Pancang Akibat Drawdown. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro Dan Komputer*, 1(3), 9–23.
- Mina, E., & Kusuma, R. I. (2019). 15 Analisis Daya Dukung Dan Penurunan Pondasi Tiang Berdasarkan Data Standard Penetration Test (SPT) Dan Cone Penetration Test (CPT)(Studi Kasus: East Cross Taxiway Bandara Internasional Soekarno Hatta). *Fondasi Jurnal Teknik Sipil*, 8(2), 130–141.
- Muthmainnah, M. (2021). *Analisis Kapasitas Dukung Dan Penurunan Pondasi Tiang Pancang Dengan Variasi Dimensi*.
- Nasional, B. S. (2020). Keputusan Kepala Badan Standardisasi Nasional Nomor 235 SNI 1727-2020. In *SNI* (Vol. 1727). BSN.
- Nugraha, A. S., & Refanie, A. (2019). Analisis Beban-Penurunan pada Pondasi Tiang Bor Berdasarkan Hasil Uji Beban Tiang Terinstrumentasi dan Program Geo5. *Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 155–167.
- Nusantara, M. A. (2014). *Analisa Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Lempung Menggunakan Perkuatan Anyaman Bambu dan Grid Bambu dengan Bantuan Program PLAXIS*. Sriwijaya University.
- Putri, M. S., Apriyanti, Y., & Fahriani, F. (2018). Analisis perbandingan daya dukung dan penurunan tiang pancang tunggal dengan metode statik dan uji beban. *PROCEEDINGS OF NATIONAL COLLOQUIUM RESEARCH AND COMMUNITY SERVICE*, 2.
- Ridar, M., & Khatib, A. (2015). Tinjauan Daya Dukung Dan Penurunan Pondasi Sumuran Di Pemuda City Walk Di Jl. Pemuda Pekanbaru Propinsi Riau. *Jurnal Saintis*, 15(1), 81–92.
- Satiawan, B., & Raswitaningrum, T. R. (2020). Evaluasi Penurunan Pondasi Tangki Minyak sesuai API 653. *Konstruksia*, 11(2), 127–133.
- Umum, D. P. (1987). Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung. *Jakarta: Yayasan Badan Penerbit PU*.
- Vesic, A. S. (1977). Design of Pile Foundations. *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, 42.
- Yandi, A. (2017). *Analisis daya dukung dan penurunan pondasi tiang pancang menggunakan data n-spt dan data sondir diverifikasi dengan hasil uji pda (pile driving analyzer) dan capwap (studi kasus proyek Dermaga di Belinyu)*. Universitas Bangka Belitung.