

## DAYA DUKUNG FONDASI TIANG BOR PADA PILAR JEMBATAN KEDONDONG

Diana Aulia<sup>1</sup> dan Istiatun<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Indonesia

Email: [diana.aulia.17@gmail.com](mailto:diana.aulia.17@gmail.com)

Email: [istiatun@sipil.pnj.ac.id](mailto:istiatun@sipil.pnj.ac.id)

### ABSTRAK

Fondasi adalah bagian krusial pada struktur bangunan yang berperan dalam menopang beban sendiri maupun beban yang bekerja di atasnya, khususnya pada jembatan. Pembangunan P14 Jembatan Kedondong pada proyek Jalan Tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan) Seksi 5B dibangun dengan menggunakan fondasi tiang bor. Dalam pelaksanaan pengeboran di titik 5, terdapat bebatuan pada kedalaman 10 m dengan kondisi tanah lunak yang menyebabkan proses pengeboran tidak dapat dilanjutkan sampai kedalaman rencana. Adanya batuan di atas tanah lunak berpotensi menyebabkan keruntuhan jika diberi beban berlebih, sehingga diperlukan penambahan tiang bor. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengenali perubahan dalam kapasitas dukung fondasi tiang bor, besar penurunan, dan penambahan biaya yang terjadi akibat adanya penambahan tiang bor dengan pembebanannya dilakukan dengan bantuan SAP2000. Semula terdapat 27 tiang berdiameter 1,2 m dan kedalaman 32 m, kemudian meningkat menjadi 28 tiang. Dalam metode Reese & Wright, diperoleh kapasitas dukung aksial tunggal sebesar 15840,309 ton, sementara sebelum penambahan tiang, kapasitas dukung aksial kelompok adalah 13970,006 ton, dan setelah penambahan tiang, kapasitasnya meningkat menjadi 14487,414 ton. Didapatkan daya dukung lateral tunggal (metode Broms) sebesar 320,961 ton, sedangkan daya dukung lateral kelompok sebelum penambahan tiang sebesar 6939,79 ton, dan setelah penambahan menjadi 7196,82 ton. Penurunan tiang tunggal sebesar 0,0173 cm, sedangkan penurunan sebelum penambahan kelompok tiang adalah 0,00249 cm, dan setelah penambahan menjadi 0,00259 cm. Berdasarkan penelitian, diketahui bahwa daya dukung fondasi tiang bor pada P14 Jembatan Kedondong, baik sebelum dan setelah penambahan tiang, mampu menopang beban sendiri dan beban yang ditempatkan di atasnya dengan tambahan biaya sebesar Rp 45.458.343,04.

**Kata kunci:** Biaya, daya dukung fondasi, penurunan, pilar jembatan, tiang bor.

### ABSTRACT

*Bridge foundation systems are essential to ensure structural stability and safety, particularly in complex geotechnical conditions. The Kedondong Bridge, part of the Cisumdawu Toll Road Section 5B, was designed using bored pile foundations. During construction at Pier P14, the drilling process encountered a rock layer above soft clay at a depth of 10 meters, which prevented further drilling and posed risks of instability under heavy loads. To mitigate this issue, the number of piles was increased from 27 to 28. This study evaluates the influence of the additional pile on axial and lateral bearing capacities, settlement, and project cost. The analysis was carried out using Standard Penetration Test (SPT) data, Reese & Wright's method for axial capacity, Broms' method for lateral capacity, and structural modeling with SAP2000. The results show that the axial capacity of the pile group increased from 11,876.4 tons to 12,316.3 tons, while the lateral capacity improved from 6,939.8 tons to 7,196.8 tons. Settlement values remained well within acceptable limits, decreasing from 0.00569 cm to 0.00312 cm after the addition. Cost analysis indicated an increase of approximately IDR 45.46 million. Overall, the inclusion of the additional bored pile enhanced the load-bearing performance and safety of the foundation with only a modest rise in cost. These findings highlight practical considerations for bored pile foundation design in areas with soft clay overlain by rock.*

**Keyword:** Bored pile foundation, Axial bearing capacity, Lateral bearing capacity, Settlement, Construction cost, Bridge pier

## PENDAHULUAN

Pembangunan jalan tol terus menjadi prioritas pemerintah untuk mewujudkan jalan yang bebas hambatan dengan tujuan meningkatkan layanan distribusi barang dan jasa, serta mendukung pemerataan ekonomi dan perkembangan wilayah. Salah satu proyek yang akan menjadi penghubung Kota Bandung dengan kota-kota disekitarnya adalah Jalan Tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan). Jalan tol sepanjang 62,60 km tersebut adalah salah satu Proyek Strategi Nasional (PSN) yang direncanakan sebagai jalan akses yang menghubungkan bagian timur dan utara Provinsi Jawa Barat (PEREKONOMIAN & INDONESIA, 2022).

Pembangunan Jalan Tol Cisumdawu Seksi 5B didalamnya terdapat pekerjaan Jembatan Kedondong yang berlokasi di daerah rawan longsor dengan kondisi geologi tanah pada lokasi tersebut didominasi oleh jenis tanah lempung berlanau (*clay silt*). Dengan mempertimbangkan kondisi tanah yang ada, maka Jembatan Kedondong dibangun dengan menggunakan fondasi tiang bor. Fondasi tiang bor merupakan salah satu jenis fondasi dalam yang dibuat di bawah permukaan tanah dengan kedalaman tertentu (Kobra Post Online, 2019).

Jenis-jenis fondasi dalam di antaranya sebagai berikut:

- Fondasi Sumuran

Dikenal sebagai fondasi sumuran karena proses pembuatannya melibatkan penggalian lubang-lubang yang menyerupai sumur sampai lapisan tanah keras. Fondasi ini digunakan ketika tanah keras terletak di kedalaman lebih dari 3 meter. Diameter fondasi ini berkisar antara 0,8 hingga 1 meter dan kemungkinan diameter bisa bervariasi di dalam satu bangunan karena tiap kolom menopang beban yang berbeda.

- Fondasi Tiang Pancang

Fondasi tiang pancang diperlukan ketika tanah di bawah dasar bangunan tidak memiliki kemampuan dukung yang memadai untuk menopang berat bangunan dan beban yang bekerja, atau jika lapisan tanah keras berada dalam kedalaman lebih dari 8 meter.

- Fondasi Tiang Bor

Fondasi tiang bor atau *bored pile*, merupakan jenis fondasi tiang yang dicor di lokasi setelah dilakukan pengeboran dan penggalian. Fondasi ini idealnya digunakan untuk tanah yang stabil pada kedalaman lebih dari 9 meter. Fondasi tiang bor sangat sesuai untuk daerah yang padat dengan bangunan karena minim kebisingan dan getaran yang tidak merusak bangunan sekitarnya (Kementrian PUPR & Departemen Pekerjaan Umum, 2021).

Namun, pada pelaksanaan pekerjaan pengeboran fondasi tiang bor pada P14 Jembatan Kedondong terdapat bebatuan di atas lapisan tanah lunak yang dapat menyebabkan keruntuhan dan mengganggu stabilitas bangunan apabila batuan tersebut menerima beban yang berlebih (Soetojo, 2009). Tanah lunak atau tanah lempung memiliki partikel-partikel sangat kecil dan menunjukkan sifat-sifat plastisitas serta kohesi (Wesley, 1973). Untuk mencegah situasi ini, penambahan tiang bor dilakukan dengan tujuan menjaga kinerja fondasi agar tetap mampu menopang beban yang ditempatkan di atasnya. Penambahan tiang tersebut akan dievaluasi pada penelitian ini dengan tujuan agar dapat mengetahui apakah daya dukung fondasi, baik sebelum maupun setelah penambahan tiang, sudah mampu menahan beban yang bekerja. Selain itu, akan dilihat besar penurunan dan penambahan biaya yang terjadi akibat adanya penambahan tiang ini.

### 1.1 Pengujian *Standard Penetration Test (SPT)*

Data tanah yang digunakan didapat dari pengujian SPT (*Standard Penetration Test*) yang melibatkan pemadatan tanah melalui pukulan untuk mendapatkan perlawanan dinamik dan mengambil sampel guna menilai kapasitas dukung tanah pada berbagai lapisan kedalaman (Hardiyatmo, 2014). Pengujian SPT mengacu pada SNI 4153:2008 dan ASTM D1586:1999. Skempton mengusulkan suatu persamaan untuk menyesuaikan nilai N dari pengujian lapangan dengan mempertimbangkan faktor-faktor, seperti prosedur pengujian, diameter lubang bor, dan panjang batang bor, yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$N_{60} = \frac{1}{0,6} E_f C_b C_s C_r N \quad (1)$$

Dengan,

$N_{60}$  = N-SPT telah dikoreksi

$E_f$  = efisiensi pemukul (**Tabel 1**)

$C_b$  = koreksi diameter lubang bor (**Tabel 2**)

$C_s$  = koreksi oleh tipe tabung sampler (**Tabel 2**)

$C_r$  = koreksi untuk panjang batang bor (**Tabel 2**)

N = nilai N-SPT hasil uji di lapangan.

**Tabel 1** Efisiensi Pemukul (Ef)

Negara	Tipe Pemukul	Mekanisme Pelepasan Pemukul	Efisiensi Pemukul (Ef)
Argentina	Donat	Cathead	0,45
Brasilia	Pin weight	Dilepas tangan	0,72
China	Otomatis	Trip	0,60
	Donat	Dilepas tangan	0,55
	Donat	Cathead	0,50
Columbia	Donat	Cathead	0,05
Jepang	Donat	Tombi trigger	0,78-0,85
	Donat	Cathead 2 turn + pelepasan spesial	0,65-0,67
Inggris	Otomatis	Trip	0,73
Amerika	Aman	2 turn on cathead	0,55-0,60
	Donat	2 turn on cathead	0,45
Venezuela	Donat	Cathead	0,43

Sumber: Clayton (1990) dalam Hardiyatmo (2014)

**Tabel 2** Faktor Koreksi SPT Akibat Pengaruh Lubang Bor, Tabung Sampler, dan Batang Bor

Faktor	Variasi Alat	Nilai Koreksi
Diameter lubang bor ( $C_b$ )	65 – 115 mm	1,00
	150 mm	1,05
	200 mm	1,15
Tabung sampler ( $C_s$ )	Tabung sampler standar	1,00
	Tabung sampler tanpa liner (tidak direkomendasikan)	1,20
Panjang batang bor ( $C_r$ )	3 – 4 m	0,75
	4 – 6 m	0,85
	6 – 10 m	0,95
	> 10 m	1,00

Sumber: Skempton, 1986 dalam Hardiyatmo, 2014

## 1.2 Pembebanan

Untuk memperoleh besaran gaya yang bekerja pada fondasi, perlu dilakukan perhitungan beban yang terdiri dari berat sendiri, beban mati, beban mati tambahan, beban lalu lintas, dan beban lingkungan, sesuai dengan pedoman dari SNI 1725:2016 dan SNI 2833:2016. Dalam proses ini, perangkat lunak SAP2000 dapat digunakan sebagai alat bantu.

## 1.3 Daya Dukung Tunggal Tiang Bor

Analisis daya dukung tiang tunggal dihitung dengan tahapan sebagai berikut:

### 1.3.1 Daya Dukung Aksial Tunggal (Metode Reese & Wright)

- Daya dukung ujung tiang bor

$$Q_p = 9 \times C_u \times A_p \text{ (kohesif)} \quad (2)$$

$$Q_p = q_p \times A_p = 7 \times N \times 10 \times A_p \text{ (non kohesif dengan } N \leq 60) \quad (3)$$

$$Q_p = q_p \times A_p = \frac{400}{0,30482} \times A_p \text{ (non-kohesif dengan } N \geq 60) \quad (4)$$

Dengan,

$Q_p$  = daya dukung tiang bor (kN)

$C_u$  = kohesi tanpa pengaliran (*undrained cohesion*) (kN/m<sup>2</sup>)

$$C_u = (N60) \times \frac{2}{3} \times 10$$

$q_p$  = tahanan ujung persatuan luas (kN/m<sup>2</sup>)

$A_p$  = luas penampang pondasi (m<sup>2</sup>)

- Daya dukung selimut tiang bor

$$Q_s = \alpha \times C_u \times A_s \text{ (kohesif)} \quad (5)$$

$$Q_s = q_s \times A_s \text{ (non-kohesif)} \quad (6)$$

Dengan,

$Q_s$  = daya dukung selimut tiang (kN)

$\alpha$  = koefisien (diambil = 0,55 untuk tiang bor)

- qs = tahanan selimut persatuan luas (kN/m<sup>2</sup>)  
 A<sub>s</sub> = Luas selimut tiang (m)
- Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal  
 $Q_u = Q_p + Q_s - W_p$  (7)  
 Dengan,  
 W<sub>p</sub> = berat sendiri tiang (ton)
  - Daya Dukung Ijin  
 $Q_{ijin} = Q_u / FS$  (8)  
 Dengan,  
 FS = faktor keamanan untuk perancangan fondasi tiang = 2,5 (Tomlinson, 1994)

1.3.2 Daya Dukung Lateral Tiang Tunggal (Metode Broms)

- Penentuan Kriteria Tiang  

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \times D}{4 \times E_p \times I_p}}$$
 (9)
- a. Untuk tiang dengan kepala bebas: tiang panjang jika  $\beta > 2,5$  dan tiang pendek jika  $\beta < 2,5$  (Hanafiah et al., 2020).
- b. Untuk tiang kepala jepit: tiang panjang jika  $\beta > 1,5$  dan tiang pendek jika  $\beta < 1,5$  (Hanafiah et al., 2020).

**Tabel 3** Parameter q<sub>u</sub> Berdasarkan Konsistensi Tanah

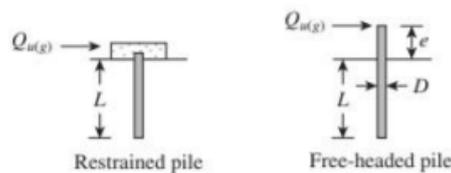
Konsistensi	Q <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
Lempung keras	>400
Lempung sangat kaku	200 – 400
Lempung kaku	100 – 200
Lempung sedang	50 – 100
Lempung lunak	25 – 50
Lempung sangat lunak	< 25

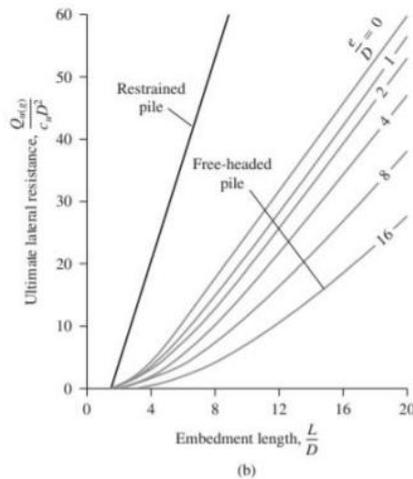
**Tabel 4** Parameter K Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas (q<sub>u</sub>) pada Lapisan Lempung

Kuat Tekan Bebas (q <sub>u</sub> )		K	
kN/m <sup>2</sup>	Lb/in <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	Lb/in <sup>3</sup>
200	30	10.000 – 20.000	37 – 75
200-800	30-120	20.000 – 40.000	75 – 150
>800	>120	>40.000	> 150

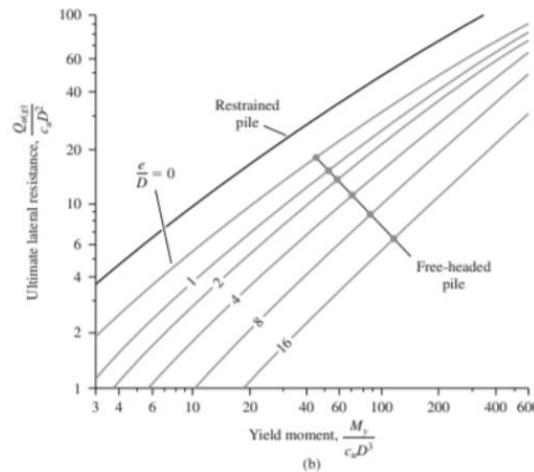
Sumber : Hardiyatmo, 2011(Hardiyatmo, 1992) dalam Januar, 2021(Januar, 2021)

- Daya Dukung Lateral Ultimit  
 Ditentukan dengan berikut:





Grafik 1 Solusi Broms Tiang Pendek pada Tanah Lunak



Grafik 2 Solusi Broms Tiang Panjang pada Tanah Lunak  
Sumber: Das, B.M.,2011(Das, 1995)

### 1.3.3 Penurunan Tiang Tunggal

Penurunan deformasi pada kedalaman tiang akibat beban vertikal  $Q_w$  dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$S_e = S_{e(1)} + S_{e(2)} + S_{e(3)} \tag{10}$$

Dimana,

$S_{e(1)}$  = penurunan elastis tiang

$S_{e(2)}$  = penurunan elastis tiang akibat beban tahanan ujung

$S_{e(3)}$  = penurunan elastis tiang akibat beban yang didistribusikan sepanjang selimut tiang

$$S_{e(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}) \times L}{A_p \times E_p} \tag{11}$$

Dimana,

$Q_{wp}$  = daya dukung ujung tiang

$Q_{ws}$  = daya dukung selimut tiang

$A_p$  = luasan penampang tiang

$L$  = panjang tiang

$E_p$  = modulus elastisitas bahan tiang

$\xi$  = faktor distribusi per satuan tahanan friksi tiang ( $f_s$ ) sepanjang selimut tiang biasanya diambil antara 0,5

hingga 0,67

$$S_{e(2)} = \frac{(q_{wp} \times D)}{E_s} (1 - \mu_s^2) \times I_{wp} \tag{12}$$

Dimana,

D = diameter tiang

qwp = beban yang di terima tiang per satuan luas ujung tiang ( $\text{kN/m}^2$ ) =  $\frac{Q_{wp}}{A_p}$

Es = modulus elastisitas tanah di bawah ujung tiang ( $\text{kN/m}^2$ ) (Tabel 4)

$\mu_s$  = angka rasio *poisson* (Tabel 5)

Iwp = faktor pengaruh bentuk ujung tiang = 0,85

**Tabel 5** Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah (Es)

Jenis Tanah	Es ( $\text{kN/m}^2$ )
<b>Lempung</b>	
Sangat Lunak	300-300
Lunak	2000-4000
Sedang	4500-9000
Keras	7000-20000
Berpasir	30000-42500
<b>Pasir</b>	
Berlanau	5000-20000
Tidak Padat	10000-25000
Padat	50000-100000
<b>Pasir dan Kerikil</b>	
Padat	80000-200000
Tidak Padat	50000-140000
Lanau	2000-20000
Loes	15000-60000
Serpih	140000-1400000

Sumber: Hardiyatmo, 1996 dalam Januar, 2021

**Tabel 6** Perkiraan Angka Poisson

Macam Tanah	$\mu_s$
Lempung Jenuh	0,4 – 0,5
Lempung Tak Jenuh	0,1 – 0,3
Lempung Berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir Padat	0,2 – 0,4
Pasir Kasar (angka pori, e = 0,4 – 0,7)	0,15
Pasir Halus (angka pori, e = 0,4 – 0,7)	0,25
Batu (agak tergantung dari macamnya)	0,1 – 0,4
Loess	0,1 – 0,3

Sumber: Hardiyatmo, 2014

$$\bullet \quad S_{e(3)} = \left( \frac{Q_{ws}}{P \times L} \right) \times \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) \times I_{ws} \quad (13)$$

Dimana,

P = keliling penampang tiang

L = panjang total tiang

$I_{ws}$  = faktor pengaruh yang ditentukan sebagai:

$$I_{ws} = 2 + 0,35 \sqrt{\frac{L}{B}}$$

#### 1.4 Daya Dukung Kelompok Tiang Bor

Dikarenakan pada umumnya fondasi tiang digunakan dalam bentuk kelompok tiang, maka perlu dilakukan analisis efisiensi tiang untuk menentukan kemampuan kelompok tersebut dalam menahan beban maksimal.

##### 1.4.1 Metode Efisiensi Tiang

- Formula Sederhana

$$E_g = \frac{2(m+n-2)s+4D}{P \times m \times n} \quad (14)$$

Dimana:

m = jumlah tiang pada deretan baris

n = jumlah tiang pada deretan kolom

s = jarak antar tiang

D = diameter atau sisi tiang

- P = keliling dari penampang tiang
- Converse Laberre, Los Angeles, dan Seiler-Keeney

Equations for Group Efficiency of Friction Piles	
Name	Equation
Converse-Labarre equation	$\eta = 1 - \left[ \frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta$ <p>where <math>\theta(\text{deg}) = \tan^{-1}(D/d)</math></p>
Los Angeles Group Action equation	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi dn_1n_2} [n_1(n_2 - 1) + n_2(n_1 - 1) + \sqrt{2}(n_1 - 1)(n_2 - 1)]$
Seiler-Keeney equation (Seiler and Keeney, 1944)	$\eta = \left\{ 1 - \left[ \frac{11d}{7(d^2 - 1)} \right] \left[ \frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0.3}{n_1 + n_2}$ <p>where <math>d</math> is in ft</p>

**Gambar 1** Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang

Sumber: Bowles, 1988 dalam Januar, 2021

#### 1.4.2 Beban Maksimal

$$P_{maks} = \frac{Pu}{np} \pm \frac{My.X_{maks}}{ny \times \sum x^2} \pm \frac{Mx.Y_{maks}}{nx \times \sum y^2} \quad (15)$$

Dimana,

$P_{maks}$  = beban maksimum tiang

$P_u$  = beban aksial yang terjadi

$M_y$  = momen yang bekerja tegak lurus sumbu Y

$M_x$  = momen yang bekerja tegak lurus sumbu X

$X_{maks}$  = Jarak tiang ke sumbu X terjauh

$Y_{maks}$  = jarak tiang ke sumbu Y terjauh

$\sum x^2$  = jumlah kuadrat X

$\sum y^2$  = jumlah kuadrat Y

$n_x$  = jumlah tiang dalam sumbu x

$n_y$  = jumlah tang dalam sumbu Y

$n_p$  = jumlah total tiang

#### 1.4.3 Penurunan Tiang Kelompok

Penurunan elastis yang terjadi pada tiang kelompok harus memenuhi syarat yaitu  $S_{g(e)} < 2,54$  cm yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S_{g(e)}(\text{mm}) = \frac{0,96 \times q \times x \sqrt{Bg \times l}}{N60} \quad (16)$$

Dimana,

$$q = \frac{Qg}{Bg \times Lg}$$

$Lg$  dan  $Bg$  = panjang dan lebar pada kelompok tiang (m)

$N60$  = jumlah pukulan SPT di bawah ujung tiang

$I$  = faktor pengaruh

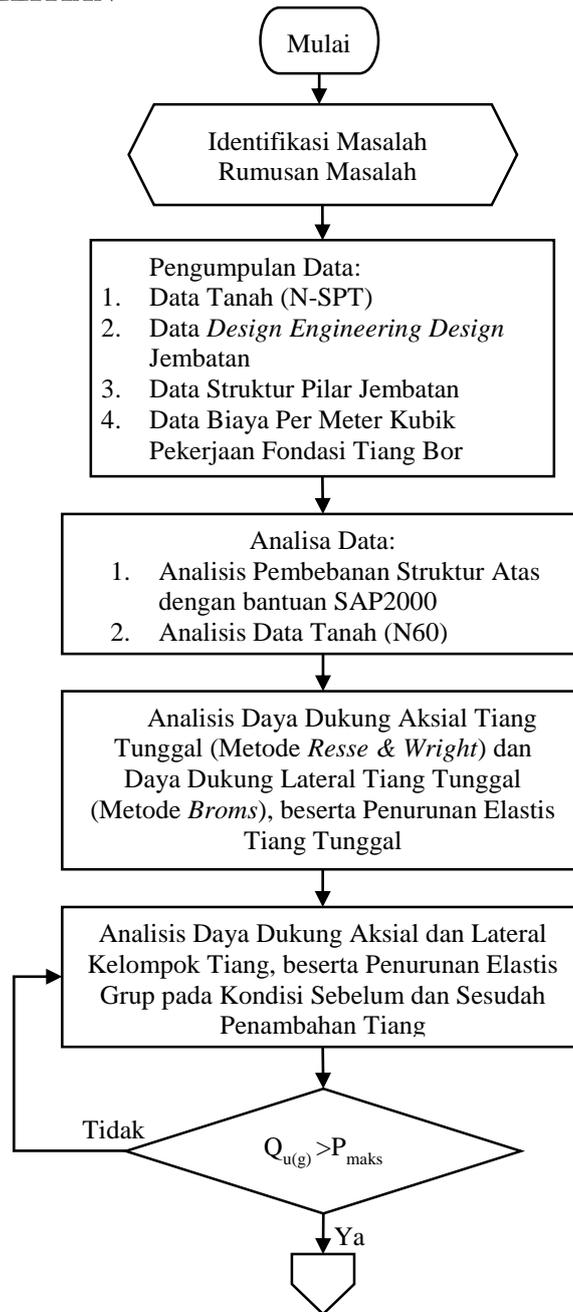
$$= 1 - \frac{L(m)}{8Bg(m)} \geq 0.50$$

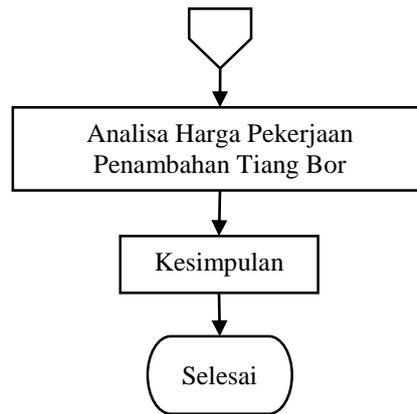
$L$  = panjang tiang dalam (m)

### 1.5 Perhitungan Biaya Pelaksanaan Pekerjaan Tiang Bor

Perhitungan biaya pelaksanaan tiang bor dipengaruhi oleh diameter tiang bor, kondisi tanah, jarak, volume, dan tingkat kesulitan (Yudha, n.d.). Analisis harga satuan pekerjaan tiang bor, baik pada kondisi sebelum dan setelah penambahan jumlah tiang, dihitung berdasarkan Permen PUPR No. 1 Tahun 2022 tentang AHSP bidang Bina Marga.

## METODOLOGI PENELITIAN





Gambar 2 Bagan Alir

Untuk mempermudah dalam memahami tahapan penelitian, berikut akan diberikan penjelasannya:

### 1. Tahap Perencanaan

Kegiatan yang terjadi selama tahap perencanaan meliputi:

- **Mengidentifikasi Masalah:** Pada tahap ini, dilakukan pengidentifikasian permasalahan yang menjadi dasar penyusunan skripsi, yang melibatkan pengumpulan informasi terkait situasi di sekitar lokasi Proyek Jalan Tol Cisumdawu Seksi 5B.
- **Merumuskan Masalah:** Pada tahap ini merupakan kelanjutan dari proses identifikasi masalah, di mana dirumuskannya permasalahan berdasarkan hal-hal yang akan diselidiki dan menetapkan batasan-batasan untuk menentukan cakupan masalah yang akan diselidiki.
- **Mengadakan Studi Pendahuluan:** Studi pendahuluan dapat dilakukan dengan studi dokumenter, kepustakaan, dan studi lapangan yang dapat digunakan sebagai referensi atau panduan dalam proses analisis data.

### 2. Tahap Pelaksanaan

Diantara kegiatan yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian diantaranya:

- **Pengumpulan Data:** Data yang diperlukan dalam merancang penelitian ini meliputi:
  - a. data tanah (N-SPT) pada lokasi pembangunan Jembatan Kedondong Jalan Tol Cisumdawu Seksi 5B dari PT Girder Indonesia,
  - b. data gambar (*shop drawing* dan *as build drawing*) Jembatan Kedondong Jalan Tol Cisumdawu Seksi 5B,
  - c. data struktur pilar Jembatan Kedondong Jalan Tol Cisumdawu Seksi 5B, dan
  - d. data totalan biaya pekerjaan tiang bor.
- **Analisis Data:** Data yang diperoleh akan digunakan sebagai referensi untuk melakukan penilaian terhadap daya dukung tiang bor pada pilar Jembatan Kedondong dengan tahapan sebagai berikut:
  - a. mengevaluasi beban pada struktur atas dengan menggunakan perangkat lunak SAP2000 dan menganalisis karakteristik tanah berdasarkan nilai pengujian Standard Penetration Test (N-SPT),
  - b. menganalisis daya dukung aksial tiang tunggal (Metode *Resse & Wright*), daya dukung lateral tiang tunggal (Metode *Broms*), beserta penurunan elastis tiang tunggal.
  - c. menganalisis daya dukung aksial dan lateral kelompok tiang, beserta penurunan elastis grup pada kondisi sebelum dan sesudah penambahan tiang.
  - d. mengoreksi dan menganalisis hasil perhitungan daya dukung aksial dan lateral tersebut apakah kuat menahan beban yang bekerja,
  - e. menganalisis biaya terhadap pekerjaan penambahan tiang bor, dan menarik kesimpulan berdasarkan hasil pengolahan data.

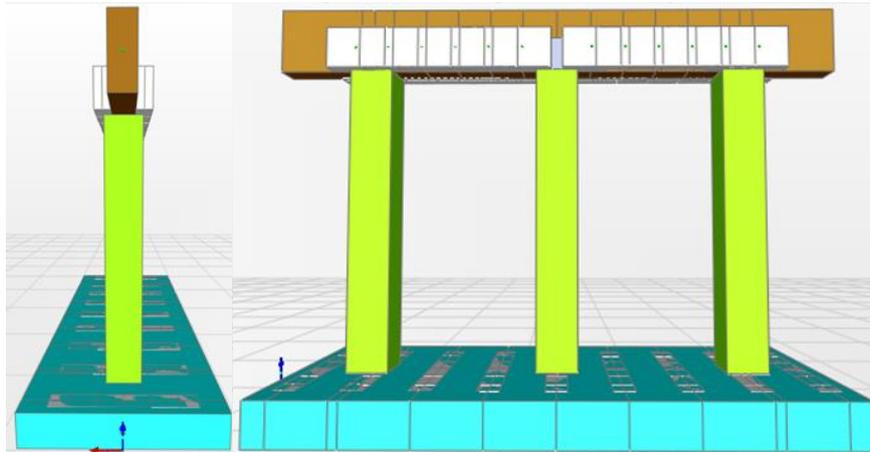
## DATA DAN ANALISIS

### 3.1 Analisis Pembebanan

Tabel 7 Hasil Perhitungan Pembebanan Struktur Atas Jembatan

Jenis Beban	Nilai (ton)
Beban Mati	936,559
Beban Mati Tambahan	76,577
Beban Lalu Lintas	175,454
Beban Aksi Lingkungan	1504,499

Berdasarkan tabel di atas, diketahui total beban struktur atas adalah 2693,089 ton. Nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam SAP2000 untuk dilakukan pemodelan dan untuk mendapatkan hasil *join reaction* sebagai berikut:



Gambar 3 Pemodelan P14 Jembatan Kedondong dengan SAP2000

Tabel 8 Hasil Join Reactions pada P14 Sebelum Penambahan Tiang dengan Aplikasi SAP 2000

Kombinasi	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	ton	ton	ton	ton.m	ton.m	ton.m
KUAT 1	-824,500	0,000	9128,875	0,000	5394	0,000
EKSTREM 1	-2175,30	2635	7695,235	3657	15210	-7037

Tabel 9 Hasil Join Reactions pada P14 Setelah Penambahan Tiang dengan Aplikasi SAP 2000

Kombinasi	F1	F2	F3	M1	M2	M3
	ton	ton	ton	ton.m	ton.m	ton.m
KUAT 1	-1315	0,000	10062,861	0,000	8185	0,000
EKSTREM 1	-2246	1004	8482,544	4272	27700	-3321

Data hasil *join reactions* akan dimanfaatkan untuk perhitungan beban maksimal dalam analisis kelompok tiang bor.

### 3.2 Analisis Data Tanah

Data tanah yang dipergunakan merujuk pada hasil uji Standard Penetration Test (N-SPT) yang terdapat di lokasi titik BL-17 karena lokasi pengujian terletak tepat di bawah pilar jembatan yang akan ditinjau, dalam hal ini P14 Jembatan Kedondong, sehingga data akan lebih mendekati dengan hasil yang seharusnya.

Contoh perhitungan pada kedalaman 32 m dengan data BL-17 sebagai berikut dengan menggunakan nilai koreksi N60 yang diambil dari **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

$$\begin{aligned}
 N &= 60 \\
 E_f &= 0,5 \\
 C_b &= 1 \\
 C_s &= 1 \\
 C_r &= 0,85
 \end{aligned}$$

Dengan Persamaan (1), maka didapatkan nilai koreksi SPT sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 N_{60} &= \frac{1}{0,6} \times E_f \times C_b \times C_s \times C_r \times N \\
 &= \frac{1}{0,6} \times 0,5 \times 1 \times 1 \times 0,85 \times 60 \\
 &= 42,50
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan nilai koreksi SPT di setiap kedalaman akan dijelaskan dalam tabel berikut.

**Tabel 10** Analisa Data Tanah

Depth (-) meter	Range M	N	Equipment and Location					Soil
			Em	Cb	Cs	Cr	N60	
0,0	0	0	0,5	1	1	0,85	0,00	LEMPUNG
1,0	1	5	0,5	1	1	0,85	3,54	
2,0	1	6	0,5	1	1	0,85	4,25	
3,0	1	7	0,5	1	1	0,85	4,96	
4,0	1	8	0,5	1	1	0,85	5,67	
5,0	1	14	0,5	1	1	0,85	9,92	PASIR
6,0	1	15	0,5	1	1	0,85	10,63	
7,0	1	21	0,5	1	1	0,85	14,88	
8,0	1	22	0,5	1	1	0,85	15,58	
9,0	1	7	0,5	1	1	0,85	4,96	LEMPUNG KELANAUAN
10,0	1	10	0,5	1	1	0,85	7,08	
11,0	1	7	0,5	1	1	0,85	4,96	
12,0	1	10	0,5	1	1	0,85	7,08	
13,0	1	13	0,5	1	1	0,85	9,21	
14,0	1	12	0,5	1	1	0,85	8,50	
15,0	1	11	0,5	1	1	0,85	7,79	
16,0	1	18	0,5	1	1	0,85	12,75	
17,0	1	21	0,5	1	1	0,85	14,88	
18,0	1	26	0,5	1	1	0,85	18,42	
19,0	1	26	0,5	1	1	0,85	18,42	
20,0	1	30	0,5	1	1	0,85	21,25	
21,0	1	46	0,5	1	1	0,85	32,58	LEMPUNG KELANAUAN
22,0	1	50	0,5	1	1	0,85	35,42	
23,0	1	56	0,5	1	1	0,85	39,67	
24,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
25,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
26,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
27,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
28,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
29,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
30,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
31,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
32,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	LEMPUNG
33,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
34,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
35,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
36,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
37,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	LEMPUNG KELANAUAN
38,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
39,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	
40,0	1	60	0,5	1	1	0,85	42,50	

### 3.3 Analisis Tiang Bor Tunggal

#### 3.3.1 Daya Dukung Aksial (Metode Reese & Wright)

**Tabel 11** Hasil Analisis Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal (Metode Reese & Wright)

<b>Qp</b>	294,203 ton
<b>ΣQs</b>	1167,596 ton
<b>Wp</b>	88,607 ton

Berdasarkan tabel di atas, maka didapatkan nilai  $Q_u$  dan  $Q_{ijin}$  sebagai berikut:

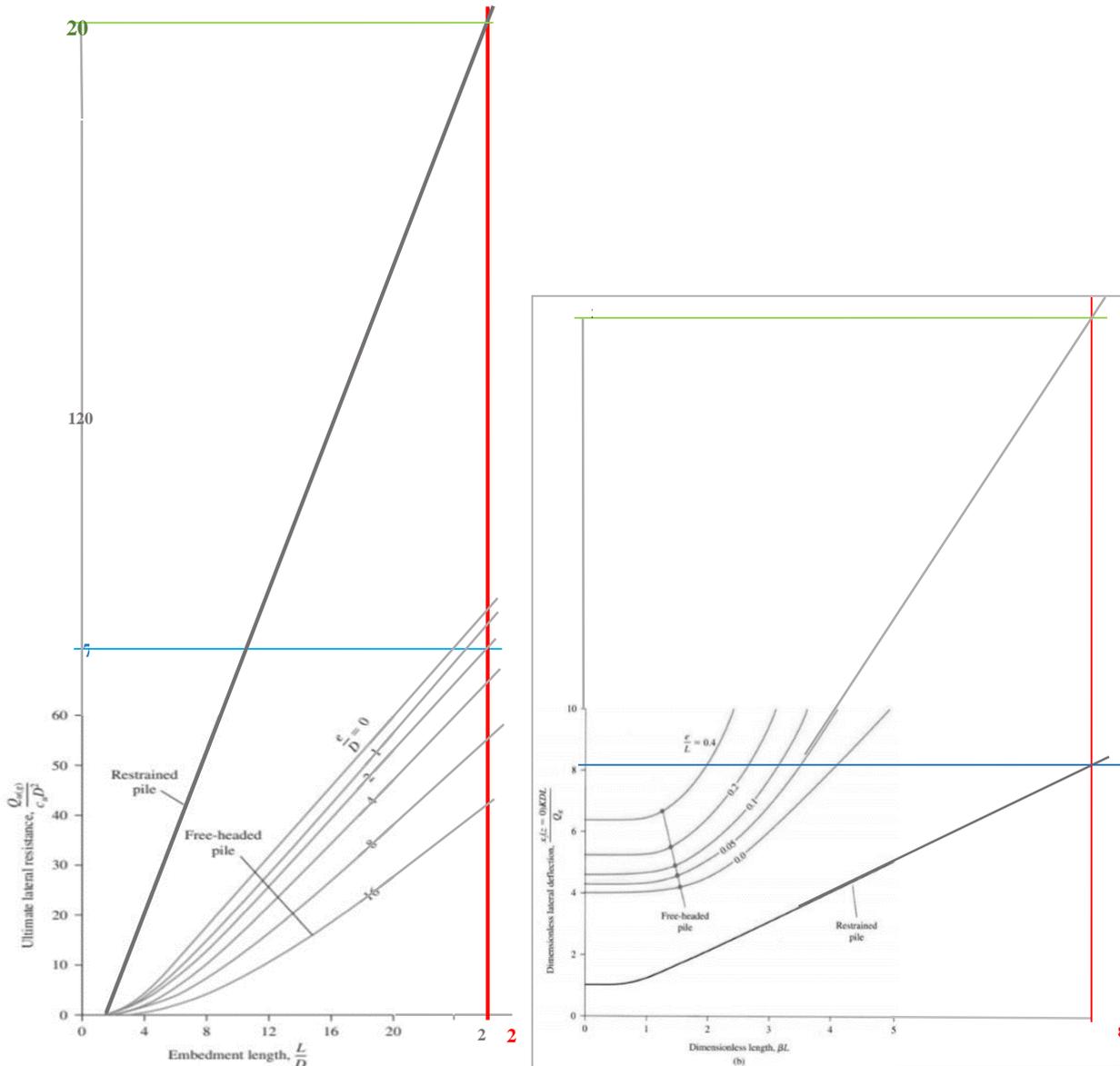
$$\begin{aligned}
 Q_u &= Q_p + Q_s - W_p \\
 &= 294,203 + 1167,596 + 88,607 \\
 &= 1373.192 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$Q_{ijin} = Q_u/S_f$$

$$= 1373.192/2,5 = 549,277 \text{ ton}$$

### 3.3.2 Daya Dukung Lateral (Metode Broms)

Digunakan parameter  $\beta$  untuk menentukan kriteria tiang dengan tanah yang berjenis lempung. Karena didapatkan nilai  $\beta$  sebesar 0,260, maka tiang termasuk ke dalam jenis tiang pendek. Setelah itu, digunakan grafik solusi Broms untuk tiang pendek dengan tujuan untuk mendapatkan daya dukung lateral.



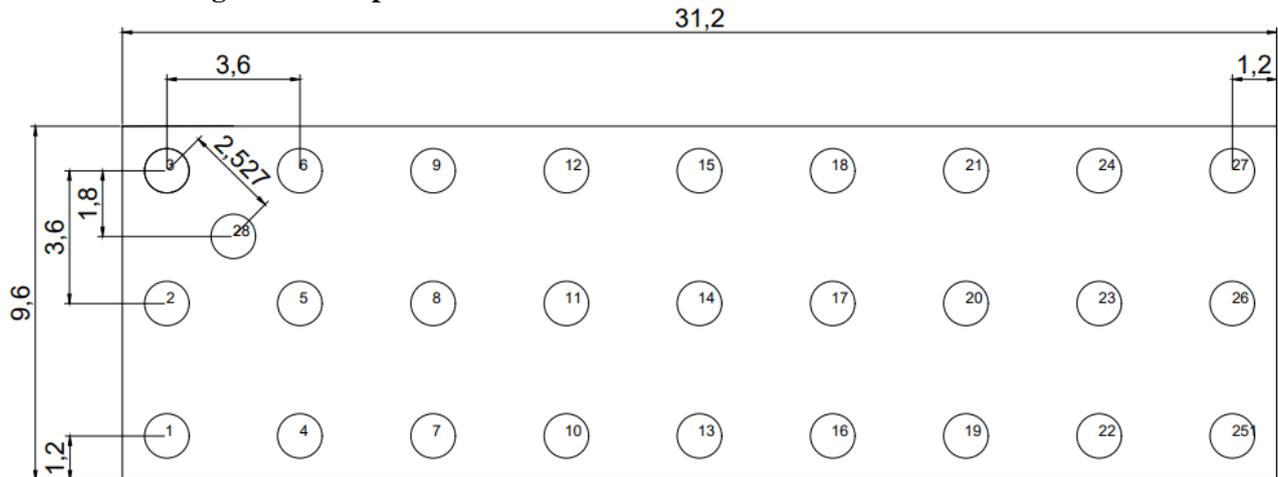
**Grafik 3** a. Metode Broms untuk Menghitung Tahanan Lateral Maksimum pada Tiang Pendek yang Terpasang dalam Lapisan Lempung  
c. Metode Broms untuk Menghitung Defleksi pada Ujung Tiang Tunggal yang Terpasang dalam Lapisan Lempung

Berdasarkan grafik di atas, maka diperoleh  $Q_u$  jepit sebesar 5400 ton dan  $Q_u$  bebas sebesar 1971 ton dan  $Q_{ijin}$  jepit sebesar 235,027 ton dan  $Q_{ijin}$  bebas sebesar 85,935 ton.

### 3.3.3 Penurunan Elastis Tiang

Penurunan elastis pada tiang dihitung dengan mengambil nilai rata-rata dari penurunan akibat deformasi tiang tunggal ( $s_{e(1)}$ ), penurunan akibat beban yang bekerja pada ujung tiang ( $s_{e(2)}$ ), dan penurunan akibat beban yang disalurkan sepanjang tiang ( $s_{e(3)}$ ) yang dihitung dengan metode *vesic*. Didapatkan nilai rata-rata penurunan tiang sebesar 1,42 cm.

### 3.4 Analisis Tiang Bor Kelompok



**Gambar 4** Konfigurasi Tiang Bor Setelah Penambahan Jumlah Tiang

#### 3.4.1 Efisiensi Kelompok Tiang

**Tabel 12** Perhitungan Efisiensi Kelompok Tiang dengan Beberapa Metode

Metode	Nilai
Formula Sederhana	0,755
Converse Laberre	0,682
Los Angeles	0,746
Seiler-Keeney	1,021

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan penurunan rata-rata ( $\eta_{rata-rata}$ ) sebesar 0,801.

#### 3.4.2 Daya Dukung Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang diestimasikan dengan mengalikan  $Q_{ijin}$  tunggal, rata-rata penurunan ( $\eta_{rata-rata}$ ), dan jumlah total tiang sebesar 27 tiang.

**Tabel 13** Daya Dukung Kelompok Tiang Sebelum dan Setelah Penambahan Tiang

	Sebelum	Setelah
<b>Aksial</b>	11876,4 ton	12316,3 ton
<b>Lateral</b>	6939,8 ton	7196,8 ton

#### 3.4.3 Beban Maksimal

**Tabel 14** Hasil Beban Maksimal Terhadap Stabilitas Daya Dukung Aksial

		Sebelum	Setelah
<b>Dinamis</b>	$P_{maks}$	643,5 ton	794,5 ton
<b>Statis</b>	$P_{maks}$	460,2 ton	504,8 ton

**Tabel 15** Hasil Beban Maksimal Terhadap Stabilitas Daya Dukung Lateral

		Sebelum	Setelah
<b>Dinamis</b>	$H_{maks}$	439,1 ton	571,8 ton
<b>Statis</b>	$H_{maks}$	152,6 ton	192,4 ton

#### 3.4.4 Penurunan Kelompok Tiang

Penurunan kelompok tiang sebelum penambahan sebesar 0,00569 cm, sedangkan kelompok tiang setelah penambahan sebesar 0,00312 cm. Diketahui kedua nilai tersebut sudah memenuhi syarat, yaitu  $Se < 2,54$  cm.

Berdasarkan **Tabel 12**, **Tabel 13**, dan **Tabel 14**, dapat diketahui bahwa **daya dukung kelompok tiang bor** sebelum atau setelah penambahan tiang memiliki nilai yang **lebih besar** dari **beban maksimal** yang bekerja pada fondasi dengan besar penurunan kelompok tiang sebelum dan setelah penambahan tiang sudah memenuhi syarat penurunan, yaitu  $Se < 2,54$  cm. Dengan data-data yang telah dianalisis, dapat dikatakan bahwa daya dukung kelompok tiang bor sudah mampu dalam mendukung beban maksimal dan beban keseluruhan yang bekerja pada tiang (Hardiyatmo, 2020).

### 3.5 Analisis Biaya Pekerjaan Tiang Bor

Analisis biaya dilakukan untuk membandingkan biaya pekerjaan fondasi tiang bor sebelum dan setelah penambahan dengan spesifikasi beton K400, kedalaman 32 m, dan diameter 1,2 m dengan waktu kerja efektif selama 7 jam per hari dan memerlukan kehadiran 6 pekerja., tukang 3 orang, dan mandor 1 orang. Diketahui produktivitas alat untuk *bored pile machine* sebesar 603,64 m<sup>2</sup>/jam dan produktivitas alat untuk *concrete pump* sebesar 6,64 m<sup>3</sup>/jam. Berikut dicantumkan pada **Tabel 15** harga satuan yang akan digunakan dalam perhitungan.

**Tabel 16** Harga Satuan yang Akan Digunakan dalam Analisis Biaya

Uraian	Satuan	Harga Satuan (Rp)
<b>Tenaga Kerja</b>		
Pekerja	jam	11.428,57
Tukang	jam	17.142,86
Mandor	jam	18.571,43
<b>Bahan</b>		
Beton K400	m <sup>3</sup>	1.050.000
Casing	m <sup>2</sup>	11.250
<b>Alat</b>		
<i>Bor pile machine</i>	jam	216.000
<i>Concrete pump</i>	jam	154.200

#### 3.5.1 Analisis Biaya Pekerjaan Tiang Bor Sebelum Penambahan Tiang

##### Koefisien Tenaga Kerja

- Pekerja =  $\frac{6}{603,64} = 0,0099$  jam
- Tukang =  $\frac{3}{603,64} = 0,0050$  jam
- Mandor =  $\frac{1}{603,64} = 0,0017$  jam

##### Kuantitas Bahan

- Beton K400 =  $A \times L \times n \times 1,05$   
=  $1,1 \times 32 \times 27 \times 1,05$   
=  $1026,019$  m<sup>3</sup>
- Casing =  $K \times L \times n \times 1,05$   
=  $3,7 \times 32 \times 27 \times 1,05$   
=  $3420,063$  m<sup>2</sup>

##### Koefisien Peralatan

- Mesin *Borpile* =  $\frac{1}{603,64} = 0,0017$  jam
- *Concrete Pump* =  $\frac{1}{6,64} = 0,0068$  jam

**Tabel 17** Tabel Perhitungan Biaya Pekerjaan Tiang Bor Sebelum Penambahan

No	Komponen	Satuan	Kuantitas/Koef.	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
<b>A Tenaga</b>					
1	Pekerja	jam	0,0099	11.428,57	113,60
2	Tukang	jam	0,0050	17.142,86	85,20
3	Mandor	jam	0,0017	18.571,43	30,77
<b>B Bahan</b>					
1	Beton K400	m <sup>3</sup>	1026,019	1.050.000,00	1.077.319.979,32
2	Casing	m <sup>2</sup>	3420,063	11.250,00	38.475.713,55
<b>C Alat</b>					
1	Mesin <i>Bor pile</i>	jam	0,0017	216.000,00	357,83
2	<i>Beton pump</i>	jam	0,0068	154.200,00	23.222,89
<b>D</b>	<b>Total Harga Tenaga, Bahan, dan Peralatan (A+B+C)</b>				1.115.819.503,15
<b>E</b>	<b>Overhead &amp; Profit (10% × D)</b>				111.518.950,31
<b>F</b>	<b>Harga Satuan Pekerjaan (D+E)</b>				1.227.401.453,46

## 3.5.2 Analisis Biaya Pekerjaan Tiang Bor Setelah Penambahan Tiang

**Koefisien Tenaga Kerja**

- Pekerja =  $\frac{6}{603,64} = 0,0099$  jam
- Tukang =  $\frac{3}{603,64} = 0,0050$  jam
- Mandor =  $\frac{1}{603,64} = 0,0017$  jam

**Kuantitas Bahan**

- Beton K400 =  $A \times L \times n \times 1,05$   
=  $1,1 \times 32 \times 28 \times 1,05$   
=  $1064,0197 \text{ m}^3$
- Casing =  $K \times L \times n \times 1,05$   
=  $3,7 \times 32 \times 28 \times 1,05$   
=  $3546,7324 \text{ m}^2$

**Koefisien Peralatan**

- Mesin *Borpile* =  $\frac{1}{603,64} = 0,0017$  jam
- *Concrete Pump* =  $\frac{1}{6,64} = 0,0068$  jam

**Tabel 18** Tabel Perhitungan Biaya Pekerjaan Tiang Bor Setelah Penambahan

No	Komponen	Satuan	Kuantitas/Koef	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
<b>A</b>	<b>Tenaga</b>				
1	Pekerja	jam	0,0099	11.428,57	113,60
2	Tukang	jam	0,0050	17.142,86	85,20
3	Mandor	jam	0,0017	18.571,43	30,77
<b>B</b>	<b>Bahan</b>				
1	Beton K400	m <sup>3</sup>	1064,0197	1.050.000,00	1.117.220.719,29
2	Casing	m <sup>2</sup>	3546,7324	11.250,00	39.900.739,97
<b>C</b>	<b>Alat</b>				
1	<i>Bor pile machine</i>	jam	0,0017	216.000,00	357,83
2	<i>Concrete pump</i>	jam	0,0068	154.200,00	23.222,89
<b>D</b>	<b>Total Harga Tenaga, Bahan, dan Peralatan (A+B+C)</b>				1.157.145.269,55
<b>E</b>	<b>Overhead &amp; Profit (10% × D)</b>				115.714.526,96
<b>F</b>	<b>Harga Satuan Pekerjaan (D+E)</b>				1.272.859.796,51

Berdasarkan **Tabel 15** yang memuat daftar harga satuan untuk digunakan dalam perhitungan biaya pekerjaan tiang bor sebelum penambahan tiang pada **Tabel 16** dan perhitungan biaya pekerjaan tiang bor sebelum penambahan tiang pada **Tabel 17**. Dapat diketahui bahwa setelah dilakukan penambahan tiang, terlihat bahwa volume pekerjaan meningkat (baik untuk beton maupun casing). Selain itu, total biaya pekerjaan juga meningkat, dari Rp 1.227.401.453,46 menjadi Rp 1.272.859.796,31. Kenaikan biaya sebesar Rp 45.458.342,85 menunjukkan peningkatan biaya sejalan dengan penambahan volume pekerjaan.

Dari hasil analisis ini, dapat direkomendasikan bahwa penambahan tiang pada pekerjaan fondasi bor secara langsung meningkatkan total biaya konstruksi. Oleh karena itu, dalam tahap perencanaan dan anggaran, perlu dipertimbangkan estimasi volume pekerjaan yang akurat agar tidak terjadi pembengkakan biaya. Penggunaan concrete pump juga berkontribusi signifikan terhadap efisiensi waktu, walaupun menambah biaya peralatan.

Pada jurnal yang ditulis oleh Putra, A., & Sari, N. (2021) yang berjudul Analisis Efisiensi Biaya pada Pekerjaan Fondasi Tiang Bor di Proyek Konstruksi Gedung, penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jumlah tiang berdampak langsung terhadap kenaikan volume material dan biaya. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian ini di mana penambahan tiang menyebabkan peningkatan volume beton dan casing serta total biaya konstruksi.

Penelitian yang dilakukan oleh Santoso, R. et al. (2022) dalam jurnal Perbandingan Metode Pelaksanaan Tiang Bor dengan dan tanpa Concrete Pump menunjukkan bahwa penggunaan concrete pump meskipun meningkatkan biaya alat, mampu mengefisienkan waktu kerja dan mengurangi biaya tenaga kerja. Hal ini juga didukung oleh hasil penelitian ini, yang menunjukkan adanya efisiensi pelaksanaan meski terdapat penambahan biaya peralatan.

Namun, hasil penelitian ini berbeda dengan jurnal yang ditulis oleh Wirawan, M. (2020) berjudul Optimasi Biaya pada Pekerjaan Pondasi dalam Menggunakan Alternatif Metode Bor. Penelitian tersebut menyarankan penggunaan metode alternatif bor manual untuk proyek berskala kecil karena lebih ekonomis, sementara penelitian ini menggunakan metode konvensional dengan concrete pump untuk efisiensi waktu. Dengan demikian, hasil penelitian ini mendukung pendekatan konvensional namun juga menegaskan pentingnya evaluasi menyeluruh terhadap kondisi lapangan dan spesifikasi proyek untuk efisiensi biaya maksimal.

## KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan pada pembahasan sebelumnya dengan panjang pile cap 31,2 m dan lebar 9,6 m, dapat diketahui bahwa total beban struktur atas adalah 2693,089 ton. Penggunaan tiang bor berdiameter 1,2 meter dengan kedalaman 32 m, didapatkan besar daya dukung aksial tiang tunggal sebesar 549,277 ton dan daya dukung lateral tiang tunggal sebesar 320,961 ton. Besar daya dukung aksial kelompok tiang pada kondisi sebelum sebesar 11.876,404 ton dan daya dukung lateral kelompok tiang pada kondisi sebelum sebesar 6939,8 ton, dengan penurunan grup pada kondisi sebelum sebesar 0,0569 mm yang mana masih memenuhi persyaratan  $S_e < 2,54$  cm. Sedangkan, besar daya dukung aksial kelompok tiang pada kondisi setelah sebesar 12316,3 ton dan daya dukung lateral kelompok tiang pada kondisi setelah sebesar 7196,8 ton, dengan penurunan grup pada kondisi setelah sebesar 0,0312 mm yang mana masih memenuhi persyaratan  $S_e < 2,54$  cm. Selain itu, juga didapatkan biaya pekerjaan tiang bor sebelum penambahan sebesar Rp 1.227.401.453,46 dan setelah penambahan sebesar Rp 1.272.859.796,51.

Dengan adanya penambahan tiang bor, daya dukung aksial kelompok tiang pada P14 Jembatan Kedondong meningkat sebesar 439,867 ton dan daya dukung lateral kelompok meningkat sebesar 257,03 ton dengan penurunan tiang tunggal sebesar 0,0142 cm, penurunan tiang kelompok sebelum penambahan jumlah tiang sebesar 0,00569 cm, dan penurunan tiang kelompok yang terjadi setelah penambahan jumlah tiang sebesar 0,00312 cm. Yang mana kedua daya dukung tersebut sudah dapat mampu mendukung beban yang diterapkan di atasnya dengan tingkat penurunan yang tetap sesuai dengan persyaratan yang ada. Selain itu, terjadi penambahan biaya sebesar Rp 45.458.343,04 akibat adanya penambahan jumlah tiang.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D1586. (1999). Standard Test Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM International, D1586-99(1999)*, 1–5.
- Das, B. M. (1995). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik. Penerbit Erlangga, 1–300.
- Hanafiah, Jaya, Z., & Reza, M. (2020). *Rekayasa Fondasi untuk Program Vokasi* (T. Erang (ed.)). Penerbit ANDI. doi
- Hardiyatmo, H. C. (1992). *Mekanika Tanah I* (M. P. Widodo (ed.)). PT Gramedia Pustaka Utama. doi
- Hardiyatmo, H. C. (2014). *Analisis dan Perancangan Fondasi I* (Siti (ed.); Edisi Keti). Gajah Mada University Press. doi
- Indonesia, S. N., & Nasional, B. S. (2008). *Cara uji penetrasi lapangan dengan*. doi
- Januar, G. R. (2021). *ANALISIS DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN PONDASI TIANG BOR PADA STRUKTUR KEPALA JEMBATAN PROYEK TOL BENGKULU – TABA PENANJUNG*. Politeknik Negeri Jakarta. doi
- Kementerian PUPR, & Departemen Pekerjaan Umum. (2021). Manual Petunjuk Teknis Pengujian Tanah. *Kementerian PUPR Departemen Pekerjaan Umum*, 54. doi
- Kobra Post Online. (2019). *Pondasi Dalam, Pengertian dan 3 Jenisnya*. <https://www.kobrapostonline.com/pondasi-dalam/>. doi
- Nasional, S. (2016). *Standar pembebanan untuk jembatan*.
- PEREKONOMIAN, K. K. B., & INDONESIA, R. (2022). Punya Twin Tunnel, Jalan Tol Cisumdawu Dorong Efek Positif Perekonomian di Jawa Barat. *5 Juli*. <https://www.ekon.go.id/publikasi/detail/4317/punya-twin-tunnel-jalan-tol-cisumdawu-dorong-efek-positif-perekonomian-di-jawa-barat>. doi
- SNI 2833. (2016). SNI (Standar Nasional Indonesia) No. 2833 Tahun 2008, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Jembatan. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*.
- Soetojo, M. (2009). *Teknik Pondasi pada Lapisan Batuan*. ITS Press. doi
- Tomlinson, M. . (1994). *Pile Design and Construction Practice*.
- Wesley, L. D. (1973). *Mekanika tanah*. Badan Penerbit Pekerjaan Umum.
- Yudha, A. N. (n.d.). *PERHITUNGAN HARGA PONDASI BORE PILE DAN STRAUSS PILE*.