

# Analisis Kapasitas Dukung Tiang Pancang Pada Tanah *Granular* Menggunakan Metode Statis Dan Dinamis

Hartini

Dosen Program Studi Teknik Sipil Unidayan, Indonesia  
email : [hartinihamid1982@gmail.com](mailto:hartinihamid1982@gmail.com)

## Abstrak

Dalam mencari nilai daya dukung tanah dapat digunakan beberapa metode yang sangat beragam, dengan menggunakan berbagai data parameter tanah. Adapun Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas dukung tiang pancang pada tanah granular dengan menggunakan metode statis dan metode dinamis. Dalam penelitian ini penentuan kapasitas dukung metode statis berdasarkan data tanah N-SPT dan metode dinamis berdasarkan data hasil kalendering dengan menggunakan alat pancang Diesel Hammer DD-55. Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa nilai kapasitas dukung menggunakan metode dinamis mendapatkan hasil yang lebih besar dibandingkan menggunakan metode statis. Pada metode statis, metode Brom mendapatkan hasil yang lebih besar dari pada menggunakan metode Poulus dan Davis. Dan pada metode dinamis, metode ENR mendapat hasil yang lebih besar dari pada metode Hilley.

**Kata kunci :** Kapasitas Dukung Tiang Pancang, Tanah Granular, Metode Statis, Metode Dinamis

## Pendahuluan

Pelaksanaan pembangunan infrastruktur seperti dermaga/pelabuhan yang memiliki tingkat keramaian yang cukup tinggi, sangat dibutuhkan tingkat kontruksi yang kokoh dengan pondasi yang kuat untuk menahan segala beban yang berasal dari atas dermaga. Variasi kondisi tanah dan tipe cara pemancangan dapat menimbulkan perbedaan yang besar pada beban ultimit yang akan mempengaruhi kapasitas dukung tiang. Sehingga untuk memberikan keyakinan berlebih kepada perencana dan pelaksana kontrukturksi, maka harus dilakukan analisis perbandingan data statis dan dinamis, yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang akurat terkait kapasitas dukung tiang-tiang yang terpancang.

Kondisi tanah yang berbeda-beda di setiap daerah di Indonesia, menyebabkan banyak peneliti yang menganalisis besaran kapasitas dukung tiang pancang. Terkhusus pada pembangunan dermaga Teluk Sulaiman yang nantinya akan dipakai untuk aktivitas bongkar muat, serta karakteristik tanahnya berjenis *granular*, maka sangat perlu untuk dilakukan perhitungan besaran kapasitas dukung tiang tunggal menggunakan metode statis (berdasarkan data tanah SPT) dan dinamis (Metode Hilley 1930 dan ENR).

Pondasi adalah komponen struktur yang berfungsi sebagai penopang bangunan dan

meneruskan beban yang berada di atasnya ke lapisan tanah yang kuat daya dukungnya (Hardiyatmo, 2006). Pada saat tertentu, pondasi bukan hanya menerima gaya vertikal dan horizontal, tetapi juga gaya tarik. Tanpa pondasi yang kuat, maka akan membahayakan bangunan yang berada di atasnya, sehingga pondasi harus direncanakan dengan baik-baik dan dengan pemilihan jenis pondasi yang tepat. Pondasi terdiri dari 2 jenis, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Salah satu jenis dari pondasi dalam adalah pondasi tiang pancang.

Menurut (Hardiyatmo, 2006), pondasi tiang pancang merupakan salah satu jenis pondasi untuk membangun bangunan skala kecil maupun besar. Pondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan bila lapisan tanah yang kuat terletak sangat dalam. Pondasi tiang digunakan untuk beberapa tujuan, antara lain :

1. Meneruskan beban bangunan yang terletak diatas air atau tanah lunak ke tanah pendukung yang kuat
2. Memadatkan tanah pasir, sehingga kapasitas dukung tanah tersebut bertambah
3. Mendukung pondasi bangunan yang permukaan tanahnya mudah tergerus air

Berikut adalah beberapa jenis pondasi tiang pancang :

1. Tiang Pancang Kayu
2. Tiang Pancang Beton Pracetak
3. Tiang Pancang Baja

Kapasitas dukung adalah kemampuan atau kapasitas dalam mendukung suatu beban. Hitungan kapasitas tiang dapat dilakukan dengan cara pendekatan statis dan dinamis. Statis dilakukan dengan cara mempelajari sifat-sifat teknis tanah yang didasarkan dengan hasil laboratorium. Dinamis dengan cara menganalisis data yang diperoleh dari pemancangan tiang.

Terdapat 2 jenis perhitungan kapasitas dukung pada tiang pancang, yaitu :

1. Tiang Tunggal
2. Kelompok Tiang

Variasi bentuk tanah dan pengaruh dari jenis pemancangan dapat mengakibatkan perbedaan yang besar pada beban ultimit tiang pada suatu bangunan. Begitu pula dengan pengaruh-pengaruh seperti :

1. Tiang dicetak diluar
2. Tiang dicor di tempat
3. Tiang berdinding rata atau bergelombang
4. Jenis bahan tiang yang digunakan

Beberapa hal diatas sangat berpengaruh pada faktor gesekan antar dinding tiang dan tanah, yang juga akan mempengaruhi kapasitas tiang.

Menurut (Hardiyatmo, 2006), struktur tanah adalah susunan butir-butir primer tanah dan agregat- agregat primer tanah secara alami menjadi bentuk tertentu yang dibatasi oleh bidang-bidang yang disebut agregat. Struktur tanah merupakan sifat fisik tanah yang menggambarkan susunan ruangan partikel tanah yang bergabung satu dengan yang lain membentuk agregat hasil proses pedogenesis. Struktur tanah berhubungan dengan cara dimana partikel pasir, debu dan liat relatif disusun satu sama lain. Setiap bagian pada struktur tanah itu saling terkait satu sama lain oleh bahan organik dan bagian dari zat alami lainnya. Namun, struktur tersebut dibatasi oleh tingkatan dan bidang yang berbeda pada setiap ukuran dan bentuknya. Tanah *granular* adalah jenis struktur tanah yang bentuknya cenderung membulat atau terlihat memiliki banyak sisi. Biasanya, diameternya tidak lebih dari 2 cm. Berdasarkan sifatnya, tanah *granular* merupakan tanah yang non kohesif atau tanah yang tidak mempunyai atau sedikit sekali lekatan antara butir-butirnya. Jenis tanah yang termasuk kedalam tanah granular yaitu pasir, kerikil, batuan dan campurannya. Tanah *granular* merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan dan badan jalan karena tanah ini mempunyai kapasitas dukung yang tinggi dan penurunan kapasitas dukung kecil asalkan tanahnya relatif padat. Penurunan kapasitas dukung terjadi

segera karena permukaan tanah diterapkan beban. Penurunan yang besar juga dapat terjadi pada tanah yang tidak padat jika terdapat getaran dengan frekuensi tinggi.

Menurut (Hardiyatmo, 2006), Diesel *Hammer* adalah sebuah alat yang digunakan untuk memukul tiang pancang masuk ke dalam tanah menjadi pondasi sebuah bangunan. Selain Diesel *Hammer*, ada beberapa alat pancang jenis lainnya, seperti *Drop Hammer*, *Stream Hammer*, *Vibration*, *Jetting*, dll. Namun pada penelitian ini menggunakan Diesel *Hammer*.

### 1. Rumusan Masalah

Bagaimana kapasitas dukung tiang pancang pada tanah granular menggunakan metode statis (melalui data tanah SPT) dan metode dinamis (Hilley 1930 dan ENR dengan alat pancang Diesel *Hammer*)

### 2. Tujuan Penelitian

Untuk mengetahui kapasitas dukung tiang pancang pada tanah granular dengan metode statis (melalui data tanah SPT) dan dinamis (metode Hilley 1930 dan metode ENR dengan alat pancang Diesel *Hammer*)

### 3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

- a. Data-data dari hasil penelitian bisa dijadikan acuan untuk pembebanan struktur dermaga/pelabuhan Teluk Sulaiman, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur.
- b. Memperoleh pengetahuan bagi penulis dan pembaca tentang perbandingan perhitungan daya dukung dengan menggunakan metode statis (melalui data tanah SPT) dan dinamis (metode Hilley 1930 dan metode ENR dengan alat pancang Diesel *Hammer*).

## Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian merupakan bentuk rancangan dalam menyusun dan melakukan penelitian. Ditugas akhir ini menggunakan metode analisis deskriptif yaitu penelitian data primer dan data sekunder. Tujuan adanya metodologi penelitian ini ialah untuk membimbing pola pikir dan proses pengerjaan untuk menjawab permasalahan yang akan diteliti.

Ada dua jenis data yang dibutuhkan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Data Primer merupakan data yang secara langsung ketika pemancangan tiang.
2. Data Sekunder merupakan data-data yang bersumber dari data-data yang telah dihimpun oleh perusahaan lain yang terlibat, dalam hal ini data perencanaan dan data *soil investigation*

Dan dengan menghitung kapasitas dukung tiang pancang dengan menggunakan metode statis (metode Brom dan metode Poulos dan Davis), dan metode dinamis (metode Hilley 1930 dan metode Engineering News-Record). Berikut persamaannya :

a. Metode Statis

Pada metode statis, persamaan pada kedua metode yang digunakan adalah sama, namun terdapat beberapa perbedaan pada penentuan nilai  $z_c$ ,  $\phi$ ,  $K_d$ , dan  $Tg\delta$ .

Berikut persamaannya :

$$Q_u = (A_b \times P_b \times N_q) + (A_s \times K_d \times P_o \times Tg\delta) - W_p \quad (1)$$

Keterangan :

- $Q_u$  = Kapasitas Ultimit Tiang Pancang
- $A_b$  = Luas penampang ujung bawah tiang ( $m^2$ )
- $P_b$  = Tekanan vertikal efektif tanah pada ujung bawah tiang ( $kN/m^2$ )
- $N_q$  = Faktor-faktor kapasitas dukung
- $A_s$  = Luas selimut tiang ( $m^2$ )
- $K_d$  = Koefisien yang tergantung dari kondisi tanah
- $P_o$  = Tekanan vertikal rata-rata di sepanjang tiang ( $kN/m^2$ )
- $\delta$  = Sudut gesek efektif antara dinding tiang dan tanah
- $W_p$  = Berat Tiang (kN)

b. Metode Dinamis

Metode yang digunakan pada metode dinamis yaitu :

1) Metode Hilley (1930)

$$Q_u = \frac{e_h \times W_r \times h}{S + (1/2)(K_1 + K_2 + K_3)} + \frac{W_r + (n^2 \times W_p)}{W_r + W_p} \quad (2)$$

Keterangan :

- $Q_u$  = Kapasitas Ultimit Tiang Pancang
- $e_h$  = Efisiensi *hammer*
- $W_r$  = Berat palu atau ram (kN)
- $h$  = Tinggi jatuhnya ram (m)
- $s$  = Penetrasi tiang per pukulan (m)
- $k_1$  = Kompresi elastis balok penutup

- $k_2$  = Kompresi elastis tiang
- $k_3$  = Kompresi elastis tanah
- $n$  = Koefisien restitusi
- $W_p$  = Berat Tiang (kN)

2) Metode *Engineering News-Record* (ENR)

$$Q_u = \frac{e_h \times W_r \times h \times (W_r + (n^2 \times W_p))}{(S + 0,25) \times W_r + W_p} \quad (3)$$

Keterangan :

- $Q_u$  = Kapasitas Ultimit Tiang Pancang
- $e_h$  = Efisiensi *hammer*
- $W_r$  = Berat palu atau ram (kN)
- $h$  = Tinggi jatuhnya ram (m)
- $s$  = Penetrasi tiang per pukulan (m)
- $n$  = Koefisien restitusi
- $W_p$  = Berat Tiang (kN)

## Hasil Penelitian Dan Pembahasan

### 1. Hasil Penelitian

a. Data hasil laboratorium.

Data hasil laboratorium yang digunakan yaitu data SPT yang dilakukan di 3 titik yang telah ditentukan.

Tiga titik yang dimaksud terdiri dari :

- a. BH.01
- b. BH.02
- c. BH.03

Berdasarkan hasil *soil investigation* CV. Prisma Soenoe, rekapitulasi nilai "N" *Standar Penetration Test* (SPT) pada titik BH.01 dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Rekapitulasi nilai N-SPT titik BH.01

No.	Kedalaman (m)	N-SPT
1	0,0 – 3,5	2,5
2	3,5 – 5,5	6,3
3	5,5 – 15,0	20,8
4	15,0 – 17,0	40,0
5	17,0 – 21,0	60,0

Berdasarkan hasil *soil investigation* CV. Prisma Soenoe, rekapitulasi nilai "N" *Standar Penetration Test* (SPT) pada titik BH.02 dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Rekapitulasi nilai N-SPT titik BH.02

No.	Kedalaman (m)	N-SPT
1	0,0 – 4,0	2,7
2	4,0 -5,5	7,0
3	5,5 – 14,5	19,4
4	14,5 – 16,0	42,0
5	16,0 – 20,0	60,0

Berdasarkan hasil soil investigation CV. Prisma Soenoe, rekapitulasi nilai “N” *Standar Penetration Test* (SPT) pada titik BH.03 dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Rekapitulasi nilai N-SPT titik BH.03

No.	Kedalaman (m)	N-SPT
1	0,0 – 3,0	2,7
2	3,0 -7,5	6,8
3	7,5 – 13,0	19,0
4	13,0 – 16,0	37,7
5	16,0 – 21,0	60,0

Berdasarkan hasil soil investigation CV. Prisma Soenoe, data  $\gamma$  dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Data  $\gamma$

Titik	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )
BH.01	15,42	5,62
BH.02	16,01	6,21
BH.03	16,33	20,8

1. Data hasil pemancangan menggunakan alat diesel hammer DD-55.

Berdasarkan pemancangan tiang pancang pada pembangunan dermaga/pelabuhan Teluk Sulaiman, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, diperoleh data sebagai berikut :

- Tiang pancang terbuat dari bahan baja
- Panjang tiang : 26 m
- Diameter tiang : 50 cm (0,5 m)
- Tebal tiang : 12 mm (0,012m)
- Tiang dipancang menggunakan alat diesel hammer DD-55
- Tinggi jatuhnya palu : 1,5 m

Tiang dipancang pada 10 titik disekitar titik BH, namun diambil *sample* dari 3 tiang terdekat dengan titik BH.01, BH.02, dan BH.03, dengan nama tiang sebagai berikut :

- P1-H (dekat titik BH.01)
- P5-H (dekat titik BH.02)
- P10-H (dekat titik BH.03)

Dari hasil penelitian terhadap data kalendering, didapatkan nilai penetrasi, yang dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Nilai penetrasi (s)

Nama Tiang	Penetrasi Per Pukulan (m)
P1-H	0,006
P5-H	0,007
P10-H	0,008

2. Pembahasan

**a. Koreksi nilai N**

Terzaghi dan Peck (1948) menganjurkan apabila nilai  $N' \geq 15$ , maka harus dikoreksi. Namun, apabila  $N' < 15$ , maka tidak perlu dikoreksi. Cara mengkoreksi nilai N yaitu sebagai berikut :

$$N = 15 + \frac{1}{2} (N' - 15) \quad (4)$$

Dengan :

N : N-SPT koreksi

N' : N-SPT lapangan

Berdasarkan hasil penelitian, koreksi nilai “N” pada titik BH.01 dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Koreksi nilai N titik BH.01

Kedalaman (m)	N'	N
0,0 – 3,5	2,5	2,5
3,5 -5,5	6,3	6,3
5,5 – 15,0	20,8	17,9
15,0 – 17,0	40,0	27,5
17,0 – 21,0	60,0	37,5

Berdasarkan hasil penelitian, koreksi nilai “N” pada titik BH.02 dapat dilihat pada Tabel 7.

**Tabel 7.** Koreksi nilai N titik BH.02

Kedalaman (m)	N'	N
0,0 – 4,0	2,7	2,5
4,0 -5,5	7,0	7,0
5,5 – 14,5	19,4	17,2
14,5 – 16,0	42,0	28,5
16,0 – 20,0	60,0	37,5

Berdasarkan hasil penelitian, koreksi nilai “N” pada titik BH.03 dapat dilihat pada Tabel 8.

**Tabel 8.** Koreksi nilai N titik BH.03

Kedalaman (m)	N'	N
0,0 – 3,0	2,7	2,7
3,0 -7,5	6,8	6,8
7,5 – 13,0	19,0	17,0
13,0 – 16,0	37,7	26,4
16,0 – 21,0	60,0	37,5

**b. Menghitung berat tiang (Wp)**

$$W_p = \pi \times \text{Berat jenis baja} \times (\text{diameter-tebal}) \times \text{tebal} \times \text{Panjang}$$

$$W_p = 3,14 \times 7850 \times (0,5 - 0,012) \times 0,012 \times 2$$

$$W_p = 3752,96 \text{ Kg}$$

$$W_p = 37,53 \text{ kN}$$

**c. Kapasitas dukung tiang P1-H**

1) Metode Statis

a) Metode Brom

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

$$A_b = 1/4 \times \pi \times d^2$$

$$= 0,25 \times 3,14 \times 0,5^2$$

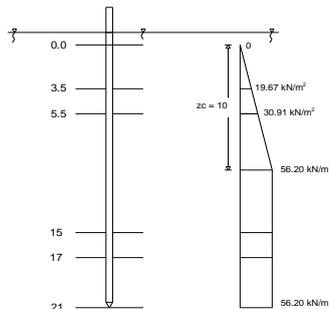
$$= 0,196 \text{ m}^2$$

Dengan menganggap  $z_c = 20d$ , maka  $z_c = 20 \times 0,5 = 10$ . Sehingga :

$$P_b = 10 \times (15,42 - 9,8)$$

$$= 56,2 \text{ kN/m}^2$$

Tekanan vertikal tiang P1-H menurut Brom, dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Tekanan Vertikal P1-H (Brom)

Dengan melihat acuan pada grafik hubungan nilai N-SPT dan sudut gesek dalam tanah. Nilai  $\phi$  dapat dilihat pada Tabel 9.

**Tabel 9.** Nilai  $\phi$  tiang P1-H

Kedalaman (m)	N	$\phi$
0,0 – 3,0	2,5	28,3
3,0 -7,5	6,3	29,2
7,5 – 13,0	17,9	32,2
13,0 – 16,0	27,5	35
16,0 – 21,0	37,5	38

Melalui Tabel 9. Dapat diketahui sudut gesek dalam tanah pada ujung bawah tiang  $\phi=38$ . Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\phi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 120$ .

Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$Q_b = A_b \times P_b \times N_q$$

$$= 0,196 \text{ m}^2 \times 56,2 \text{ kN/m}^2 \times 120$$

$$= 1321,82 \text{ kN}$$

$$\text{Kontrol } F_b = Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2$$

$$= 1321,82/0,196 = 6743,98 < 10700$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Dengan melihat acuan Tabel 9, nilai koefisien tanah berdasarkan bahan tiang menurut Brom, serta sudut segek antara dinding dan tanah menurut Aas, dapat menentukan nilai  $K_d Tg\delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 10.** Nilai  $K_d Tg\delta$

Kedalaman	Kepadatan	$K_d$	$\delta$	$K_d Tg\delta$
0,0 – 3,0	Tidak Padat	0,50	20	0,18
3,0 -7,5	Tidak Padat	0,50	20	0,18
7,5 – 13,0	Sedang	0,75	20	0,27
13,0 – 16,0	Sedang	0,75	20	0,27
16,0 – 21,0	Padat	1,00	20	0,36

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Perhitungan  $Q_s$  P1-H metode Brom

Kedalaman	Tinggi	$K_d Tg\delta$	$A_s (K \times T)$	
			$\bar{p}_o$	$A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o$
1,57	3,5	0,18	$\frac{(0 + (3,5\gamma'))}{2} = 9,84$	9,73
1,57	5,5-3,5 = 2	0,18	$\frac{(5,5\gamma') + (3,5\gamma')}{2} = 25,29$	14,29
1,57	10-5,5 = 4,5	0,27	$\frac{(5,5\gamma') + (10\gamma')}{2} = 43,56$	83,08
1,57	15-10 = 5	0,27	56,2	119,12
1,57	17-15 = 2	0,27	56,2	47,65
1,57	21-17 = 4	0,36	56,2	127,06
$Q_s = \sum A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o =$				400,92

$$\text{Kontrol } F_s = K_d Tg\delta P_o < 107 \text{ kN/m}^2$$

$$0,36 \times 56,2 = 20,23 \text{ kN/m}^2 < 107 \text{ kN/m}^2$$

➤ Kapasitas ultimit netto ( $Q_u$ )

$$Q_u = Q_b + Q_s + W_p$$

$$= 1321,82 \text{ kN} + 400,92 \text{ kN} + 37,53 \text{ kN}$$

$$= 1760,27 \text{ kN}$$

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$Q_i = Q_u / S_F = 1760,27 \text{ kN} / 2,5$$

$$= 704,11 \text{ kN}$$

b) Metode Poulos dan Davis

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

Dengan merubah Tabel 9. menjadi  $\phi'$ , juga dengan memperhatikan grafik hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg\delta$ , dapat ditentukan nilai  $z_c/d = 9$ , maka :

$$z_c = 9 \times 0,5 = 4,5$$

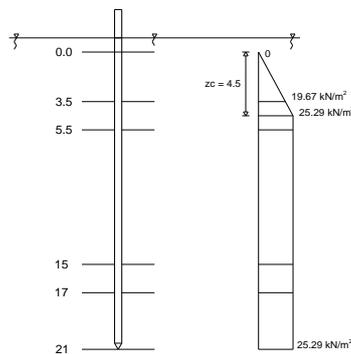
Tekanan *Overburden* pada  $z_c \geq 4,5$  :

$$P_o = 4,5 \times (15,42 - 9,8)$$

$$= 25,29 \text{ kN/m}^2$$

Karena  $z \geq z_c$ , maka  $P_b = P_o$

Tekanan vertikal tiang P1-H menurut Poulos dan Davis, dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Tekanan Vertikal P1-H (Poulos dan Davis)

$$\begin{aligned} \phi &= 1/2 (\phi' + 40) \\ &= 1/2 (38 + 40) \\ &= 1/2 \times 78 \\ &= 39 \end{aligned}$$

Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\phi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 130$ .

Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$\begin{aligned} Q_b &= A_b \times P_b \times N_q \\ &= 0,196 \text{ m}^2 \times 25,29 \text{ kN/m}^2 \times 130 \\ &= 644,39 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kontrol } F_b &= Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2 \\ &= 644,39 / 0,196 = 3287,7 < 10700 \end{aligned}$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Dengan melihat acuan Tabel 9, nilai sudut gesek sepanjang tiang menurut Poulos dan Davis, serta hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg \delta$ , dapat menentukan nilai  $K_d Tg \delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 12.

**Tabel 12.** Nilai  $K_d Tg \delta$

Kedalaman	$\phi'$	$\phi = 0,75\phi' + 10$	$K_d Tg \delta$
0,0 – 3,0	28,3	31,2	1,11
3,0 – 7,5	29,2	31,9	1,15
7,5 – 13,0	32,2	34,2	1,30
13,0 – 16,0	35	36,3	1,50
16,0 – 21,0	38	38,5	1,80

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 13.

**Tabel 13.** Perhitungan  $Q_s$  P1-H metode Poulos dan Davis

Keliling	Tinggi	$K_d Tg \delta$	$\bar{p}_o$	$A_s K_d Tg \delta \bar{p}_o$
1,57	3,5	1,11	$\frac{(0 + (3,5 \times \gamma'))}{2} = 9,84$	59,99
1,57	4,5-3,5 = 1	1,15	$\frac{(19,67 + 25,29)}{2} = 22,48$	40,59
1,57	5,5-4,5 = 1	1,15	25,29	45,66
1,57	15-5,5 = 9,5	1,30	25,29	490,36
1,57	17-15 = 2	1,50	25,29	119,12
1,57	21-17 = 4	1,80	25,29	285,88
$Q_s = \sum A_s K_d Tg \delta \bar{p}_o =$				1041,59

$$\begin{aligned} \text{Kontrol } F_s &= K_d Tg \delta P_o < 107 \text{ kN/m}^2 \\ 1,80 \times 25,29 &= 45,52 < 107 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

➤ Kapasitas ultimit netto ( $Q_u$ )

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_b + Q_s + W_p \\ &= 644,39 \text{ kN} + 1041,59 \text{ kN} + 37,53 \text{ kN} \\ &= 1723,51 \text{ kN} \end{aligned}$$

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_u / SF = 1723,51 \text{ kN} / 2,5 \\ &= 689,40 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Metode Dinamis

a) Metode Hilley (1930)

$$\begin{aligned} Q_u &= \frac{1 \times 96,04 \times 1,5}{0,006 + \frac{1}{2} (0 + 0,002 + 0,0025)} + \frac{96,4 + 0,5^2 + 37,53}{96,04 + 37,53} \\ &= 11668,86 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 11668,86 / 4 = 2917,22 \text{ kN}$$

b) Metode Engineering News-Record (ENR)

$$\begin{aligned} Q_u &= \frac{1 \times 9795,35 \times 150 \times (9795,35 + (0,5^2 \times 3752,96))}{(0,6 + 0,25) \times (9795,35 + 3752,96)} \\ &= 1369136,26 \text{ Kg} = 13426,64 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 13426,64 / 6 = 2237,77 \text{ kN}$$

**d. Kapasitas dukung tiang P5-H**

1) Metode Statis

a) Metode Brom

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

$$A_b = 1/4 \times \pi \times d^2$$

$$= 0,25 \times 3,14 \times 0,5^2$$

$$= 0,196 \text{ m}^2$$

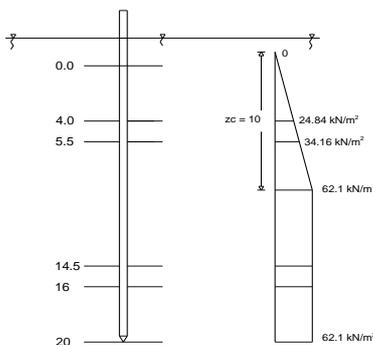
Dengan menganggap  $z_c = 20d$ , maka

$$z_c = 20 \times 0,5 = 10. \text{ Sehingga :}$$

$$P_b = 10 \times (16,01 - 9,8)$$

$$= 62,1 \text{ kN/m}^2$$

Tekanan vertikal tiang P5-H menurut Brom, dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Tekanan Vertikal P5-H (Brom)

Dengan melihat acuan pada grafik hubungan nilai N-SPT dan sudut gesek dalam tanah. Nilai  $\phi$  dapat dilihat pada Tabel 14.

**Tabel 14.** Nilai  $\phi$  tiang P5-H

Kedalaman (m)	N	$\phi$
0.0 – 4.0	2.7	28,5
4.0 – 5.5	7.0	29,7
5.5 – 14.5	17.2	32
14.5 – 16.0	28.5	35,5
16.0 – 20.0	37.5	38

Melalui Tabel 14. Dapat diketahui sudut gesek dalam tanah pada ujung bawah tiang  $\phi=38$ . Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\phi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 120$ . Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$Q_b = A_b \times P_b \times N_q$$

$$= 0,196 \text{ m}^2 \times 62,1 \text{ kN/m}^2 \times 120$$

$$= 1460,59 \text{ kN}$$

$$\text{Kontrol } F_b = Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2$$

$$= 1460,59/0,196 = 7451,99 < 1070$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Nilai koefisien tanah berdasarkan bahan tiang menurut Brom, serta sudut segek antara dinding dan tanah menurut Aas, dapat menentukan nilai  $K_d Tg\delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 15.

**Tabel 15.** Nilai  $K_d Tg\delta$

Kedalaman	Kepadatan	$K_d$	$\delta$	$K_d Tg\delta$
0.0 – 4.0	Tidak Padat	0,50	20	0,18
4.0 – 5.5	Tidak Padat	0,50	20	0,18
5.5 – 14.5	Sedang	0,75	20	0,27
14.5 – 16.0	Sedang	0,75	20	0,27
16.0 – 20.0	Padat	1,00	20	0,36

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 16.

**Tabel 16.** Perhitungan  $Q_s$  P5-H metode Brom

Keliling	Tinggi	$K_d Tg\delta$	$\bar{p}_o$	$A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o$
1,57	4	0,18	$\frac{0 + (4\gamma')}{2} = 12,42$	14,04
1,57	5,5-4 = 1,5	0,18	$\frac{(4\gamma') + (5,5\gamma')}{2} = 29,5$	12,5
1,57	10-5,5 = 4,5	0,27	$\frac{(5,5\gamma') + (10\gamma')}{2} = 48,13$	91,81
1,57	14,5-10 = 4,5	0,27	62,1	118,46
1,57	16-14,5 = 1,5	0,27	62,1	39,49
1,57	20-16 = 4	0,36	62,1	140,4
$Q_s = \sum A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o =$				416,7

$$\text{Kontrol } F_s = K_d Tg\delta P_o < 107 \text{ kN/m}^2$$

$$0,36 \times 62,1 = 22,36 \text{ kN/m}^2 < 107 \text{ kN/m}^2$$

➤ Kapasitas ultimit netto ( $Q_u$ )

$$Q_u = Q_b + Q_s + W_p$$

$$= 1460,59 \text{ kN} + 416,70 \text{ kN} + 37,53 \text{ kN}$$

$$= 1914,82 \text{ kN}$$

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$Q_i = Q_u / S_F = 1914,82 \text{ kN} / 2,5$$

$$= 765,93 \text{ kN}$$

b) Metode Poulos dan Davis

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

Dengan merubah Tabel 9. menjadi  $\phi'$ , juga dengan memperhatikan grafik hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg\delta$ , dapat ditentukan nilai  $z_c/d = 9$ , maka :

$$z_c = 9 \times 0,5 = 4,5$$

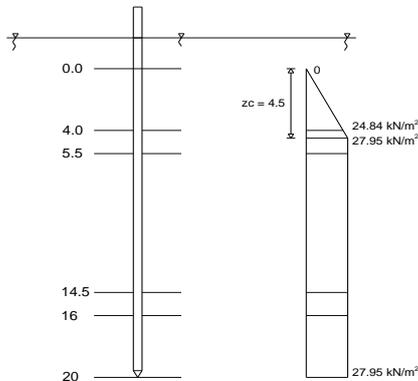
Tekanan *Overburden* pada  $z_c \geq 4,5$  :

$$P_o = 4,5 \times (16,01 - 9,8)$$

$$= 27,95 \text{ kN/m}^2$$

Karena  $z \geq z_c$ , maka  $P_b = P_o$

Tekanan vertikal tiang P5-H menurut Poulus dan Davis, dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Tekanan Vertikal P1-H (Poulus dan Davis)

$$\begin{aligned} \varphi &= 1/2 (\varphi' + 40) \\ &= 1/2 (38 + 40) \\ &= 1/2 \times 78 \\ &= 39 \end{aligned}$$

Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\varphi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 130$ .

Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$\begin{aligned} Q_b &= A_b \times P_b \times N_q \\ &= 0,196 \text{ m}^2 \times 27,95 \text{ kN/m}^2 \times 130 \\ &= 712,17 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kontrol } F_b &= Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2 \\ &= 712,17 / 0,196 = 3633,50 < 10700 \end{aligned}$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Dengan melihat acuan Tabel 9., nilai sudut gesek sepanjang tiang menurut Poulus dan Davis, serta hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg \delta$ , dapat menentukan nilai  $K_d Tg \delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 17.

**Tabel 17.** Nilai  $K_d Tg \delta$

Kedalaman	$\varphi'$	$\varphi = 0,75\varphi' + 10$	$K_d Tg \delta$
0.0 – 4.0	28,5	31,4	1,13
4.0 – 5.5	29,7	32,3	1,15
5.5 – 14.5	32	34	1,29
14.5 – 16.0	35,5	36,6	1,52
16.0 – 20.0	38	38,5	1,80

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 18.

**Tabel 18.** Perhitungan  $Q_s$  P5-H metode Poulus dan Davis

Keliling	$A_s (K \times T)$		$\bar{p}_o$	$A_s K_d Tg \delta \bar{p}_o$
	Tinggi	$K_d Tg \delta$		
1,57	4	1,13	$\frac{0 + (4\gamma')}{2} = 12,42$	88,14
1,57	4,5-4 = 0,5	1,15	$\frac{(4\gamma') + 27,95}{2} = 26,39$	23,83
1,57	5,5-4,5 = 1	1,15	27,95	50,45
1,57	14,5-5,5 = 9	1,29	27,95	509,37
1,57	16-14,5 = 1,5	1,52	27,95	100,03
1,57	20-16 = 4	1,80	27,95	315,89
$Q_s = \sum A_s K_d Tg \delta \bar{p}_o =$				1087,71

$$\begin{aligned} \text{Kontrol } F_s &= K_d Tg \delta P_o < 107 \text{ kN/m}^2 \\ 1,80 \times 27,95 &= 50,30 < 107 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

➤ Kapasitas ultimit netto ( $Q_u$ )

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_b + Q_s + W_p \\ &= 712,17 \text{ kN} + 1087,71 \text{ kN} + 37,53 \text{ kN} \\ &= 1837,41 \text{ kN} \end{aligned}$$

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_u / SF = 1837,41 \text{ kN} / 2,5 \\ &= 734,96 \text{ kN} \end{aligned}$$

2) Metode Dinamis

a) Metode Hilley (1930)

$$\begin{aligned} Q_u &= \frac{1 \times 96,04 \times 1,5}{0,007 + \frac{1}{2} (0 + 0,002 + 0,0025)} + \frac{96,4 + 0,5^2 + 37,53}{96,04 + 37,53} \\ &= 11668,86 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 11668,86 / 4 = 2917,22 \text{ Kn}$$

b) Metode Engineering News-Record (ENR)

$$\begin{aligned} Q_u &= \frac{1 \times 9795,35 \times 150 \times (9795,35 + (0,5^2 \times 3752,96))}{(0,7 + 0,25) \times (9795,35 + 3752,96)} \\ &= 1225016,65 \text{ Kg} = 12013,31 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 12013,31 / 6 = 2002,22 \text{ kN}$$

e. Kapasitas dukung tiang P10-H

1) Metode Statis

a) Metode Brom

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

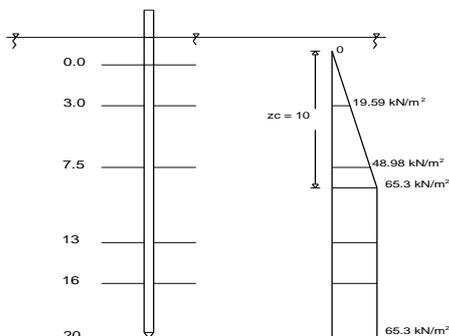
$$\begin{aligned} A_b &= 1/4 \times \pi \times d^2 \\ &= 0,25 \times 3,14 \times 0,5^2 \\ &= 0,196 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dengan menganggap  $z_c = 20d$ , maka  $z_c = 20 \times 0,5 = 10$ .

Sehingga :

$$P_b = 10 \times (16,33 - 9,8) = 65,3 \text{ kN/m}^2$$

Tekanan vertikal tiang P10-H menurut Brom, dapat dilihat pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Tekanan Vertikal P10-H (Brom)

Dengan melihat acuan pada grafik hubungan nilai N-SPT dan sudut gesek dalam tanah. Nilai  $\phi$  dapat dilihat pada Tabel 19.

**Tabel 19.** Nilai  $\phi$  tiang P10-H

Kedalaman (m)	N	$\phi$
0.0 – 3.0	2.7	28,5
3.0 – 7.5	6.8	29,5
7.5 – 13.0	17	31,9
13.0 – 16.0	26.4	34,6
16.0 – 20.0	37.5	38

Melalui Tabel 19. Dapat diketahui sudut gesek dalam tanah pada ujung bawah tiang  $\phi=38$ . Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\phi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 120$ .

Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$Q_b = A_b \times P_b \times N_q = 0,196 \text{ m}^2 \times 65,3 \text{ kN/m}^2 \times 120 = 1535,86 \text{ kN}$$

$$\text{Kontrol } F_b = Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2 = 1535,86/0,196 = 7836,02 < 10700$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Dengan melihat acuan Tabel 19, nilai koefisien tanah berdasarkan bahan tiang menurut Brom, serta sudut segek antara dinding dan tanah menurut Aas, dapat menentukan nilai  $K_d Tg\delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 20.

**Tabel 20.** Nilai  $K_d Tg\delta$

Kedalaman	Kepadatan	$K_d$	$\delta$	$K_d Tg\delta$
0.0 – 3.0	Tidak Padat	0,50	20	0,18
3.0 – 7.5	Tidak Padat	0,50	20	0,18
7.5 – 13.0	Sedang	0,75	20	0,27

13.0 – 16.0	Sedang	0,75	20	0,27
16.0 – 20.0	Padat	1,00	20	0,36

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 21.

**Tabel 21.** Perhitungan  $Q_s$  P10-H metode Brom

Keliling	Tinggi	$K_d t g \delta$	$\bar{p}_o$	$A_s K_d t g \delta \bar{p}_o$
1,57	3	0,18	$\frac{0 + (3\gamma')}{2} = 9,8$	8,3
1,57	7,5-3 = 4,5	0,18	$\frac{(3\gamma') + (7,5\gamma')}{2} = 34,28$	43,6
1,57	10-7,5 = 2,5	0,27	$\frac{(7,5\gamma') + (10\gamma')}{2} = 57,14$	60,55
1,57	13-10 = 3	0,27	65,3	83,04
1,57	16-13 = 3	0,27	65,3	83,04
1,57	20-16 = 4	0,36	65,3	147,63
$Q_s = \sum A_s K_d t g \delta \bar{p}_o =$				426,17

$$\text{Kontrol } F_s = K_d Tg\delta P_o < 107 \text{ kN/m}^2$$

$$0,36 \times 65,3 = 23,50 \text{ kN/m}^2 < 107 \text{ kN/m}^2$$

➤ Kapasitas ultimit netto ( $Q_u$ )

$$Q_u = Q_b + Q_s + W_p = 1535,86 \text{ kN} + 426,17 \text{ kN} + 37,53 \text{ kN} = 1999,56$$

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$Q_i = Q_u / S_F = 1999,56 \text{ kN} / 2,5 = 799,82 \text{ kN}$$

b) Metode Poulos dan Davis

➤ Tahanan Ujung Ultimit ( $Q_b$ )

Dengan merubah Tabel 19. menjadi  $\phi'$ , juga dengan memperhatikan grafik hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg\delta$ , dapat ditentukan nilai  $z_c/d = 9$ , maka:

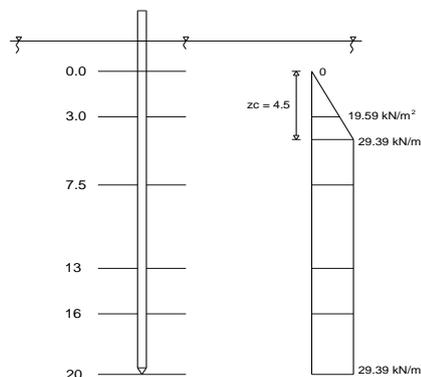
$$z_c = 9 \times 0,5 = 4,5$$

Tekanan *Overburden* pada  $z_c \geq 4,5$

$$P_o = 4,5 \times (16,33 - 9,8) = 29,39 \text{ kN/m}^2$$

Karena  $z \geq z_c$ , maka  $P_b = P_o$

Tekanan vertikal tiang P10-H menurut Poulos dan Davis, dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Tekanan Vertikal P1-H (Poulos dan Davis)

$$\begin{aligned}\varphi &= 1/2 (\varphi' + 40) \\ &= 1/2 (38 + 40) \\ &= 1/2 \times 78 \\ &= 39\end{aligned}$$

Dengan memperhatikan grafik hubungan nilai  $N_q$  dengan  $\varphi$ . dan  $L/d = 26/0,5 = 52$ , maka  $N_q = 130$ .

Sehingga tahanan ujung bawah tiang :

$$\begin{aligned}Q_b &= A_b \times P_b \times N_q \\ &= 0,196 \text{ m}^2 \times 29,39 \text{ kN/m}^2 \times 130 \\ &= 748,86 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Kontrol } F_b &= Q_b / A_b < 10700 \text{ kN/m}^2 \\ &= 748,86 / 0,196 = 3820,70 < 10700\end{aligned}$$

➤ Tahanan gesek ultimit ( $Q_s$ )

Dengan melihat acuan Tabel 19., nilai sudut gesek sepanjang tiang menurut Poulos dan Davis, serta hubungan  $z_c/d$  dan  $K_d Tg\delta$ , dapat menentukan nilai  $K_d Tg\delta$ , yang dapat dilihat pada Tabel 22.

**Tabel 22.** Nilai  $K_d Tg\delta$

Kedalaman	$\varphi'$	$\varphi = 0,75\varphi' + 10$	$K_d Tg\delta$
0.0 – 3.0	28,5	31,4	1,13
3.0 – 7.5	29,5	32,1	1,19
7.5 – 13.0	31,9	33,9	1,39
13.0 – 16.0	34,6	35,95	1,48
16.0 – 20.0	38	38,5	1,80

Sehingga perhitungan tahanan gesek dapat dihitung seperti pada Tabel 23.

**Tabel 23.** Perhitungan  $Q_s$  P10-H metode Poulos dan Davis

$A_s(K \times T)$		$K_d Tg\delta$	$\bar{p}_o$	$A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o$
Keliling	Tinggi			
1,57	3	1,13	$\frac{0 + (3\gamma')}{2} = 9,78$	52,13
1,57	4,5-3 = 1,5	1,19	$\frac{(3\gamma') + 29,39}{2} = 24,49$	68,62
1,57	7,5-4,5 = 3	1,19	29,39	164,7
1,57	13-7,5 = 5,5	1,39	29,39	352,7
1,57	16-13 = 3	1,48	29,39	204,84
1,57	20-16 = 4	1,80	29,39	332,17
$Q_s = \sum A_s K_d Tg\delta \bar{p}_o =$				1175,16

➤ Kapasitas yang diizinkan ( $Q_i$ )

$$\begin{aligned}Q_i &= Q_u / SF = 1961,55 \text{ kN} / 2,5 \\ &= 784,62 \text{ kN}\end{aligned}$$

2) Metode Dinamis

a) Metode Hilley (1930)

$$\begin{aligned}Q_u &= \frac{1 \times 96,04 \times 1,5}{0,008 + \frac{1}{2} (0 + 0,002 + 0,0025)} + \frac{96,4 + 0,5^2 + 37,53}{96,04 + 37,53} \\ &= 11668,86 \text{ kN}\end{aligned}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 11668,86 / 4 = 2917,22 \text{ kN}$$

b) Metode Engineering News-Record (ENR)

$$Q_u = \frac{1 \times 9795,35 \times 150 \times (9795,35 + (0,5^2 \times 3752,96))}{(0,8 + 0,25) \times (9795,35 + 3752,96)}$$

$$= 1108348,4 \text{ Kg} = 10869,19 \text{ kN}$$

Kapasitas dukung yang diizinkan :

$$Q_i = Q_u / S_f = 10869,19 / 6 = 1811,53 \text{ kN}$$

Untuk lebih jelasnya nilai kapasitas dukung dan kapasitas izin metode statis dan dinamis dapat dilihat pada Tabel 24 dan Tabel 25 berikut ini:

**Tabel 24.** Rekapitulasi nilai kapasitas dukung dan kapasitas izin metode statis

Nama Tiang	Metode Statis			
	Brom	$Q_i$	Poulos dan Davis	$Q_i$
P1-H	1760,27 kN	704,11 kN	1723,51 kN	689,40 kN
P5-H	1914,82 kN	765,93 kN	1837,96 kN	734,96 kN
P10-H	1999,56 kN	799,82 kN	1961,55 kN	784,62 kN

**Tabel 25.** Rekapitulasi nilai kapasitas dukung dan kapasitas izin metode dinamis

Nama Tiang	Metode Dinamis			
	Hilley (1930)	$Q_i$	ENR	$Q_i$
P1-H	11668,86 kN	2917,22 kN	13426,64 kN	2237,77 kN
P5-H	11668,86 kN	2917,22 kN	12013,31 kN	2002,22 kN
P10-H	11668,86 kN	2917,22 kN	10869,19 kN	1811,53 kN

## Kesimpulan

Dari hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa Perhitungan kapasitas dukung menggunakan metode dinamis mendapatkan hasil yang lebih besar dibandingkan menggunakan metode statis. Pada metode statis, metode Brom mendapatkan hasil yang lebih besar dibandingkan menggunakan metode Poulos dan Davis. Sedangkan pada metode dinamis, metode ENR (*Engineering News-Record*) mendapatkan hasil yang lebih besar dibandingkan menggunakan metode Hilley (1930). Seperti pada

tiang P1-H, metode statis metode Brom mendapatkan hasil 1760,27 kN, metode statis metode Poulos dan Davis mendapatkan hasil 1719,95 kN, metode dinamis metode Hilley mendapatkan hasil 11668,86 kN, dan metode dinamis metode ENR mendapatkan hasil 13426,64 kN.

## Daftar Pustaka

- Fisika Kuliah, (2016). *Tabel Modulus Elastisitas*, diakses : <https://fisikazone.com/modulus-elastisitas/>
- Hardiyatmo, HaryChristady. (2006). *Teknik Pondasi II*, Cetakan ke 3, Yogyakarta.
- Jaya, D.D. (2016). Analisis daya dukung tiang pancang pada pembangunan manado town square iii. *Skripsi*, tidak diterbitkan. Manado : Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.
- Lukman, H. (2017). Rasio daya dukung tiang pancang berdasarkan hasil kalendering. *Skripsi*, tidak diterbitkan. Bogor : Fakultas Teknik Universitas Pakuan.
- Maldini, A.R. (2018). *Data spesifikasi alat pancang DD55*, diakses : <https://id.scribd.com/document/378234271/Data-Spesifikasi-Alat-Pancang-Dd55>
- Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1980). *Piles Foundation Analysis and Design*, John Willey & Sons, New York.
- Randyatno, E.S. (2015). Analisis daya dukung tiang pancang pada pembangunan manado Town Square III. *Skripsi*, tidak diterbitkan. Manado : Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.
- Reese, L.C. & Van Impe, W.F. (2001). *Single Piles and Pile Group Under Lateral Loading*. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Santoso, R.D. (2017). Analisa daya dukung tiang pancang statis dan dinamis pada bendungan gerak sembayat gresik. *Skripsi*, tidak diterbitkan. Lamongan : Fakultas Teknik Universitas Islam Lamongan.
- Tomlinson, M.J. (1977). *Pile Design and Construction Practice*, The Garden City Press Limited, Lechworth, Hertfordshire SG6 1JS.