

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Uraian Umum

Pondasi adalah bagian terendah dari bangunan yang meneruskan beban bangunan ke tanah atau batuan yang berada di bawahnya. Terdapat dua klasifikasi pondasi, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam. Pondasi dangkal didefinisikan sebagai pondasi yang mendukung bebannya secara langsung, seperti: pondasi telapak, pondasi memanjang, dan pondasi rakit. Pondasi dalam didefinisikan sebagai pondasi yang meneruskan beban bangunan ke tanah keras atau batu yang terletak relative jauh dari permukaan, contohnya pondasi sumuran dan pondasi tiang. (Hary Christady Hardiyatmo, 2011)

Perancangan pondasi harus dipertimbangkan terhadap keruntuhan geser dan penurunan yang berlebihan. Untuk ini, perlu dipenuhi dua kriteria, yaitu: kriteria stabilitas dan kriteria penurunan. Menurut Hardiyatmo, 2011 persyaratan – persyaratan yang harus dipenuhi dalam perancangan pondasi adalah:

1. Faktor aman terhadap keruntuhan akibat terlampauinya daya dukung harus dipenuhi. Dalam hitungan daya dukung, umumnya digunakan faktor aman 3.
2. Penurunan pondasi harus masih dalam batas – batas nilai yang ditoleransikan. Khususnya penurunan yang tak seragam (*differential settlement*) harus tidak mengakibatkan kerusakan pada struktur.

Untuk terjaminnya stabilitas jangka panjang, perhatian harus diberikan pada perletakan dasar pondasi. Pondasi harus diletakkan pada kedalaman yang cukup untuk menanggulangi resiko erosi permukaan, gerusan, kembang susut tanah, dan gangguan tanah di sekitar pondasi lainnya.

2.2 Pondasi *Bored Pile*

Menurut Anugrah Pamungkas, 2013, pondasi tiang termasuk jenis pondasi dalam. Terdapat beberapa macam jenis pondasi tiang, antara lain tiang pancang dan tiang bor. Pondasi dalam dipilih bila tanah keras terletak pada kedalaman lebih dari 10 meter dibawah permukaan tanah.

Beberapa alasan digunakannya pondasi tiang untuk mendukung suatu beban bangunan (Moesdarjono Soetojo, 2014) antara lain sebagai berikut:

1. Lapisan tanah keras untuk mendukung bangunan terletak jauh dibawah permukaan tanah .
2. Lapisan tanah yang berada di dekat (dangkal) dengan bangunan mengalami gerusan.
3. Beban bangunan sangat berat tidak mampu didukung oleh tanah permukaan sehingga perlu dukungan dari lapisan tanah keras.
4. Bangunan memiliki sistem struktur yang sangat sensitive terhadap perbedaan penurunan.
5. Bangunan konstruksi lepas pantai sering kali digunakan.
6. Didaerah dengan muka air tanah yang tinggi seringkali menghindari sistem pondasi langsung karena kesulitan dalam pelaksanaannya.
7. Pondasi harus menerima beban horizontal yang cukup besar, sedang beban vertical tetap bekerja.

Bor pile atau *bored pile* adalah teknik membangun pondasi yang memanfaatkan bantuan mesin bor. Tanah akan dikeruk menggunakan mesin tersebut hingga kedalaman tertentu, kemudian diisi dengan tulang besi dan cor beton. Biasanya jenis *boredpile* banyak digunakan pada area sempit yang sisi kanan kirinya sudah banyak terisi oleh bangunan lain. Meski begitu, *bored pile* punya kualitas ketahanan baik khususnya untuk pemakaian dalam jangka waktu lama.

Apabila sudah merencanakan untuk membuat sebuah konstruksi bangunan maka perlu mengikuti persyaratan struktur bangunan gedung yang sudah ditentukan. Persyaratan tersebut meliputi bangunan gedung yang dibuat harus kokoh, stabil, dan kuat supaya dapat digunakan sesuai dengan fungsinya. Persyaratan ini sesuai Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 29/PRT/M/2006 tentang Pedoman Persyaratan Teknis Bangunan Gedung.

Diameter tiang bor pada umumnya dipakai ≥ 75 cm, dan mutu beton yang digunakan rendah, berhubungan sangat sulit dikontrol. Penampang tiang bor dapat dibuat lebih besar pada bagian bawah atau yang disebut berbentuk bel. Diameter bel bervariasi sampai 3 meter atau lebih.

Berikut ini adalah perhitungan untuk dimensi penampang tiang bor :

a. *Penentuan Diameter Tiang*

Bila diketahui :

❖ Tegangan beton $f_c = 0,25 \times f_c'$

❖ Q_w = Beban kerja

❖ A = Luas penampang tiang

Maka,

$$A = \frac{Q_w}{f_c} = \frac{Q_w}{0,25 \times f_c'} \dots\dots\dots 1$$

$$\frac{1}{4} \pi D S^2 = \frac{Q_w}{0,25 \times f_c'} \rightarrow D S = 2,257 \sqrt{\frac{Q_w}{f_c'}} \dots\dots\dots 2$$

b. *Bila Tiang Memakai Penulangan Tunggal (Profil)*

Maka,

$$Q_w = (A_{gs} - A_s) f_c + A_s \bar{\sigma}_s \dots\dots\dots 3$$

Dimana:

A_s = Luas Penampang Profil

$\bar{\sigma}_s$ = Diambil $0,5\sigma$ leleh

c. *Untuk Pemakaian Pipa (casing) Tetap*

$\bar{\sigma}_s$ = Diambil $0,4\sigma$ leleh

Berdasarkan SNI 2847:2019 Tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung menyatakan bahwa jumlah dan susunan tiang pada tiang bor harus ditentukan dari gaya momen tak terfaktor yang di transmisikan ke komponen tiang tersebut, dan kapasitas komponen tiang izin berdasarkan prinsip – prinsip mekanika tanah dan batuan. Untuk pondasi tiang jarak antara as ke as tidak boleh kurang dari keliling tiang atau untuk tiang berbentuk lingkaran tidak boleh kurang dari $2,5x$ diameter tiang.

Terdapat beberapa kelebihan serta kelemahan saat menggunakan pondasi *bored pile* ini. Adapun kelebihan dan kelemahan dari *pondasi bored pile* adalah sebagai berikut :

Tabel 2.1 Kelebihan dan Kekurangan Pondasi Bored Pile

No	Kelebihan	Kekurangan
1	Tidak mengalami pergerakan ke samping pada kondisi tanah lempung dan struktur yang bergelombang.	Cuaca buruk dapat mempersulit proses pengerjaan pondasi bored pile.

2	Dapat mengurangi getaran pada tanah.	Kepadatan tanah dapat mengalami penurunan saat proses pengeboran berlangsung.
3	Tidak mengeluarkan suara bising saat proses pemasangan.	Dapat menimbulkan tanah runtuh (ground loss).
4	Cocok digunakan pada area yang memiliki lahan sempit.	Timbunan lumpur adalah hal yang rentan saat mengebor pada kedalaman tertentu.
5	Ukuran diameter dan kedalaman tiang bervariasi.	Perlu adanya bentonite untuk menahan kepadatan tanah saat dibangun diatas jenis tanah berpasir.
6	Dasar pondasi bored pile dapat diperbesar, sehingga dapat memberikan ketahanan yang cukup besar untuk gaya keatas.	Perlu casing tambahan agar proses cor tidak kemasukan air berlebih.
7	Mudah untuk disambung	Sulit untuk menyambung setelah pembetonan.

(Braja M. Das 1990)

Pemasangan pondasi *boredpile* ke dalam tanah dilakukan dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu, yang kemudian diisi tulangan yang telah dirangkai dan dicor beton. Apabila tanah mengandung air, maka dibutuhkan pipa besi atau yang biasa disebut dengan *temporary casing* untuk menahan dinding lubang agar tidak terjadi kelongsoran, dan pipa ini akan dikeluarkan pada waktu pengecoran beton. (Wayan, 2020)

2.3 Sondir (*Cone Penetration Test*)

Berdasarkan SNI 2827:2008 Tentang Cara Uji Penetrasi Lapangan Dengan Alat Sondir, dalam desain struktur tanah pondasi sering dilakukan analisis stabilitas dan perhitungan desain pondasi suatu bangunan dengan menggunakan parameter tanah baik tegangan total maupun tegangan efektif. Parameter perlawanan penetrasi dapat diperoleh dengan berbagai cara. Dalam melakukan uji penetrasi lapangan ini digunakan metode pengujian lapangan dengan alat sondir yang berlaku baik untuk alat penetrasi konus tunggal maupun ganda yang ditekan secara mekanik

Tujuan dilakukannya sondir ini adalah untuk memperoleh parameter-parameter perlawanan penetrasi lapisan tanah di lapangan. Parameter tersebut

berupa perlawanan konus (q_c), perlawanan geser (f_s), angka banding geser (R_t), dan geseran total tanah (T_t), yang dapat dipergunakan untuk interpretasi perlapisan tanah dan bagian dari desain pondasi. Koefisien konsolidasi merupakan beberapa pengukuran yang dapat dilihat juga hasilnya dengan melakukan tes sondir.

2.3.1 Tahapan Uji Sondir Tanah

Berdasarkan SNI 2827:2008 Tentang Cara Uji Penetrasi Lapangan Dengan Alat Sondir menjelaskan untuk melakukan uji sondir ada beberapa tahapan yaitu:

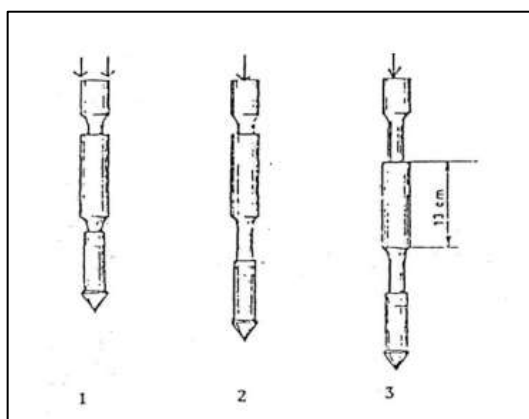
1. Persiapan Sebelum Pengujian
 - a.) Siapkan lubang sedalam 65 cm untuk penusukan pertama.
 - b.) Masukkan 4 buah angker kedalam tanah sesuai letak rangka pembebanan.
 - c.) Setel rangka pembebanan, sehingga pembebanan berdiri vertical.
 - d.) Pasang manometer untuk tanah lunak 0 s.d 2 Mpa dan 0 s.d 5 Mpa atau untuk tanah keras 0 s.d 5 Mpa dan 0 s.d 20 Mpa.
 - e.) Periksa sistem hidraulik dengan menekan piston hidraulik menggunakan kunci piston, dan bila kurang tambahkan oli serta cegah terjadinya gelembung udara dalam sistem.
 - f.) Tempatkan rangka pembebanan, sehingga penekanan hidraulik berada tepat di atasnya.
 - g.) Pasang balok-balok penjepit pada jangkar dan kencangkan dengan memutar baut pengencang.
 - h.) Sambungkan konus ganda dengan batang dalam dan batang dorong serta kepala pipa dorong.
2. Prosedur Pengujian (Penekanan Pipa Dorong)
 - a.) Dirikan batang dalam dan pipa dorong di bawah penekan hidraulik pada kedudukan yang tepat.
 - b.) Dorong/tarik kunci pengatur pada kedudukan siap tekan, sehingga penekan hidraulik hanya akan menekan pipa dorong.
 - c.) Putar engkol searah jarum jam (kecepatan 10 s.d 20 mm/s), sehingga gigi penekan dan penekan hidraulik bergerak turun dan

menekan pipa luar sampai mencapai kedalaman 20 cm sesuai interval pengujian.

- d.) Pada setiap interval 20 cm lakukan penekanan batang dalam dengan menarik kunci pengatur, sehingga penekanan hidrolik menekan batang dalam saja di kedudukan 1. (**Gambar 2.1**)

3. Prosedur Pengujian (Penekanan Batang Dalam)

- a.) Baca perlawanan konus pada penekanan batang dalam sedalam kira-kira 4 cm pertama di kedudukan 2. (**Gambar 2.1**)
- b.) Baca jumlah perlawanan geser dan perlawanan konus pada penekanan batang sedalam ± 4 cm yang kedua di kedudukan 3. (**Gambar 2.1**)



Gambar 2.1 Kedudukan Pergerakan Konus Pada Waktu Pengujian Sondir. (SNI 2827:2019)

2.4 Analisis Kapasitas Daya Dukung dari Hasil Sondir

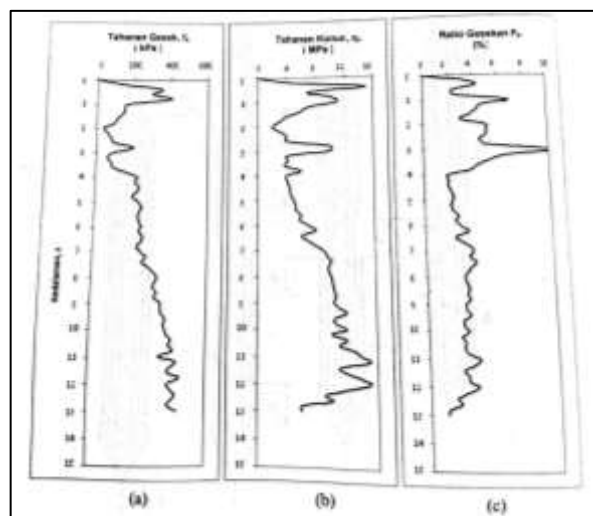
Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah memikul tekanan, atau tekanan maksimum yang diijinkan yang bekerja pada tanah di atas pondasi. Daya dukung terfaktor atau *Factored Bearing Capacity* adalah kemampuan tanah memikul tekanan atau tekanan maksimum pada batas runtuh. (Anugrah Pamungkas, 2013)

Berdasarkan SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, daya dukung izin tanah dimana pondasi tersebut akan dibangun, akibat beban kerja harus diambil yang terkecil dari:

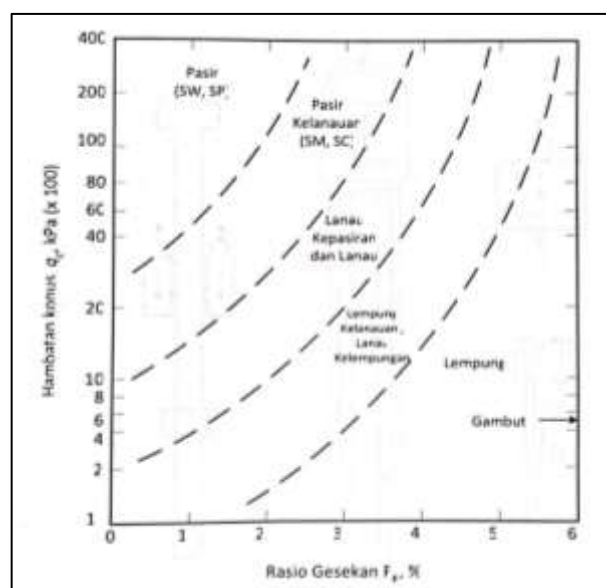
1. Kapasitas ultimit tanah dengan faktor keamanan yang cukup terhadap kemungkinan terjadinya keruntuhan.

2. Suatu nilai yang memberikan deformasi pondasi akibat beban yang bekerja masih dalam batas-batas yang diizinkan oleh bangunan tersebut, atau bangunan di sekitarnya.

Hasil pembacaan tahanan konus (q_c) dan tahanan gesek (f_s) pada setiap kedalaman kemudian di presentasikan dalam **Gambar 2.2a** dan **Gambar 2.2b**. Sedangkan prosentase rasio antara tahanan gesek dan tahanan konus dipresentasikan pada **Gambar 2.2c**. Perbandingan rasio antara tahanan gesek dan tahanan konus, F_R (**Gambar 2.2c**) dapat digunakan untuk memprediksi tanah (**Gambar 2.3**). (Robertson and Campanella,1983)



Gambar 2.2 Grafik Hasil Pengujian Sondir.
(Robertson and Campanella, 1983)



Gambar 2.3 Jenis tanah berdasarkan pengujian sondir.
(Robertson and Campanella, 1983)

Hubungan daya dukung tanah dengan data sondir dapat dilihat hubungan nilai tahanan konus (q_c) terhadap konsistensi tanah, sebagai berikut:

Tabel 2.2 Hubungan Nilai Tahanan Konus (q_c) Terhadap Konsistensi Tanah

No	Jenis Tanah	Nilai Tahanan Konus (q_c)
1	Tanah yang sangat lunak	$< 5 \text{ kg/cm}^2$
2	Lunak	$5 - 10 \text{ kg/cm}^2$
3	Teguh	$10 - 20 \text{ kg/cm}^2$
4	Kenyal	$20 - 40 \text{ kg/cm}^2$
5	Sangat kenyal	$40 - 80 \text{ kg/cm}^2$
6	Keras	$80 - 150 \text{ kg/cm}^2$
7	Sangat keras	$> 150 \text{ kg/cm}^2$

(Anugrah, Pamungkas. 2013)

Berdasarkan SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, kapasitas ultimit tiang diperoleh dari tahanan gesek sepanjang selimut tiang ditambah dengan tahanan ujung tiang. Kontribusi dari masing – masing terhadap kapasitas total tiang tergantung antara lain kepada kepadatan, kuat geser tanah dan karakteristik dari tiang. Kapasitas ultimit dari tiang tunggal akibat beban vertikal diperoleh dari penjumlahan kuat geser sepanjang selimut tiang ditambah dengan tahanan ujung tiang dengan rumus:

$$Q_{ult} = Q_s + Q_b = \sum_{z=0}^L f A_s + q A_b \dots\dots\dots 4$$

Q = Kapasitas ultimit tiang tunggal.

Q_s = Kapasitas tahanan friksi ultimit (*ultimate skin resistance*).

Q_b = Kapasitas tahanan ujung ultimit (*ultimate end bearing resistance*).

Prinsip perhitungan daya dukung menurut SNI 8460:2017 meliputi kapasitas tahanan selimut ditambah dengan kapasitas tahanan ujung ultimate, sehingga untuk metode – metode yang akan dipakai dalam perhitungan daya dukung pondasi akan menggunakan prinsip berikut ini adalah metode - metode yang akan dipakai untuk perhitungan :

2.4.1 Metode Aoki dan De Alencar

Daya dukung ultimate pondasi dinyatakan dengan rumus:

$$Q_{ult} = (q_b \times A_p) \dots\dots\dots 5$$

Dimana:

Q_{ult} = Kapasitas daya dukung bored pile

q_b = Tahanan ujung sondir

A_p = Luas penampang tiang

Kapasitas dukung ujung persatuan luas (q_b) diperoleh sebagai berikut:

$$Q_b = \frac{q_{ca(base)}}{F_b} \dots\dots\dots 6$$

Dimana:

$q_{ca(base)}$ = Perlawanan konus rata – rata 1,5D di atas ujung tiang. 1,5D dibawah ujung tiang.

F_b = Faktor empirik (tergantung pada tipe tiang)

Tahanan kulit persatuan luas (f)

$$f = q_{c(side)} \frac{as}{F_s} \dots\dots\dots 7$$

Dimana:

$q_{c(side)}$ = Perlawanan konus rata – rata.

F_s = Faktor empirik tahanan kulit (tergantung pada tipe tanah).

Tabel 2.3 Faktor Empirik F_b dan F_s

Tipe Tiang Pancang	F_b	F_s
Bored pile	3,5	7,0
Besi	1,75	3,5
Baja	1,75	3,5

(Titi dan Farshakh, 1999)

Tabel 2.4 Faktor Empirik “s” (Nilai untuk Berbagai Jenis Tanah)

Tipe Tanah	s (%)	Tipe Tanah	s (%)	Tipe Tanah	s (%)
Pasir	1,4	Lumpur berpasir	2,2	Tanah liat berpasir	2,4
Pasir berlumpur	2,0	Lanau berpasir dengan lempung	2,8	Lempung berpasir dengan lanau	2,8
Pasir berlumpur dengan tanah	2,4	Lanau	3,0	Lumpur tanah liat dengan pasir	3,0

liat					
Pasir lempung dengan lanau	2,8	Lumpur lempung dengan pasir	3,0	Tanah liat berlumpur	4,0
Pasir lempung	3,0	Lumpur lempung	3,4	Tanah liat	6,0

(Titi dan Farshakh, 1999)

2.4.2 Metode Price dan Wardle

Price dan Wardle mengusulkan hubungan berikut untuk mengevaluasi daya dukung ujung tiang unit (q_t) tiang dari tahanan ujung kerucut. Daya dukung pondasi tiang dengan metode ini dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$Q_b = q_t \times A_p \dots\dots\dots 8$$

$$q_t = K_b \times q_c \dots\dots\dots 9$$

Dimana:

Q_b = Daya dukung ujung tiang.

q_t = Perlawanan ujung sondir dengan faktor koreksi.

A_p = Luas penampang tiang.

K_b = Faktor pemancangan (0,35 pancang dan 0,3 hidraulik).

q_c = Tahanan ujung sondir.

Daya dukung kulit pondasi tiang (f) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_s = f \times A_s \dots\dots\dots 10$$

$$f = k_s \times f_s \dots\dots\dots 11$$

Dimana:

K_s = Faktor pemancangan (0,53 pancang, 0,62 hidraulik, dan 0,49 bor).

f_s = Perlawanan geser. (Titi dan Farsakh, 1999)

2.4.3 Metode Meyerhof

Meyerhof (1956) menganjurkan formula daya dukung untuk tiang. Daya dukung tiang dengan metode Meyerhof dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

Tahanan ujung tiang (Q_b) :

$$Q_b = q_c \times A_p \dots\dots\dots 12$$

Dimana:

q_c = Perlawanan konus rata-rata 8D diatas ujung tiang dan 4D dibawah ujung tiang .

Tahanan gesek dinding tiang (Q_s):

$$Q_s = f_s \times A_s \dots\dots\dots 13$$

Dimana:

A_p = Luas selimut tiang.

f_s = Perlawanan Geser. (*Hardiyatmo, 2014*)
(untuk tiang pancang beton, kayu $f_s = q_c / 200$)

Sehingga, untuk daya dukung ultimate (Q_{ult}) adalah:

$$Q_{ult} = (q_c \times A_p) + (f_s \times A_s) \dots\dots\dots 14$$

Dimana:

Q_{ult} = Kapasitas daya dukung tiang pancang tunggal.

q_c = Tahanan ujung sondir.

A_p = Luas penampang tiang.

f_s = Perlawanan geser.

A_s = Luas selimut tiang. (*Hardiyatmo, 1956*)

Daya dukung ijin pondasi tiang dinyatakan dalam rumus sebagai berikut:

$$Q_{ijin} = \left(\frac{q_c \times A_p}{3} \right) + \left(\frac{f_s \times A_s}{5} \right) \dots\dots\dots 15$$

Dimana:

3 = Faktor keamanan untuk daya dukung tiang.

5 = Faktor keamanan untuk gesekan pada selimut tiang.

2.4.4 Metode Philipponnat

Philipponnat mengusulkan hubungan berikut untuk memperkirakan daya dukung ujung unit tiang (q_b) dari tahanan ujung kerucut (q_c). Daya dukung ujung pondasi tiang dengan metode ini dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_b = k_b \times q_{ca} \dots\dots\dots 16$$

Dimana:

k_b = Faktor yang tergantung pada jenis tanah. (**Tabel 2.5**)

q_{ca} = Tahanan ujung kerucut.

Tahanan ujung kerucut:

$$q_{ca} = \frac{q_{ca(A)} + q_{cb(B)}}{2} \dots\dots\dots 17$$

Dimana:

$q_{ca(A)}$ = Perlawanan konus rata-rata dalam 3B diatas ujung tiang.

$q_{ca(B)}$ = Perlawanan konus rata-rata dalam 3B dibawah ujung tiang.

B = Lebar tiang.

Daya dukung selimut tiang (Q_s) dtentukan oleh:

$$Q_s = \frac{K_t}{2} \times JHP \dots\dots\dots 18$$

Dimana:

JHP = Jumlah Hambatan Lekat.

K_t = Keliling Tiang.

Tabel 2.5 Faktor Daya Dukung (k_b)

Tipe Tanah	k_b
Kerikil	0,35
Pasir	0,40
Lanau	0,45
Tanah liat	0,50

(Titi dan Farshakh, 1999)

2.5 Pile Driving Analyzer Test (PDA Test)

Pile Driving Analyzer Test (PDA Test) adalah jenis pengujian pondasi dengan memberikan impact/tumbukan kepada pondasi dengan *Hammer* dimana pondasi tersebut telah dipasang sensor *Transducer (velocity)* dan *Accelerometer (force)*. Tujuan pengujian tiang dengan *Pile Driving Analyzer Test* adalah untuk mendapatkan data sebagai berikut:

1. Daya Dukung aksial tiang.
2. Keutuhan/Integritas tiang
3. Efisiensi energi yang ditransfer.

Daya dukung yang dihasilkan dari analisis PDA pada kondisi ini adalah benar-benar daya dukung ultimate atau batas yang dimiliki oleh pondasi tiang yang diuji. Kondisi ultimate ditentukan oleh salah satu dari:

1. Telah bergerakinya tiang pancang akibat beban tertentu (beban ultimate), yang berarti terlampauinya tahanan friksi dan ujung dari pondasi tiang.
2. Telah terlampauinya kemampuan material tiang pancang itu sendiri, yang jika diteruskan dengan beban yang lebih berat akan mengakibatkan kegagalan pada bahan/material tiang pancang. (Ir. Hanafiah H.Z.,M.T, 2020)

Pelaksanaan PDA Test mengacu pada ASTM D-4945 (*Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*) menggunakan prosedur yang disebut *Case Method*. Prosedur *Case Method* ini menganalisa kecepatan (*velocity*) dan gaya (*force*) yang diambil dari pukulan hammer secara real time sehingga nantinya didapatkan nilai daya dukung pondasi tiang tunggal. Selama pelaksanaan pengujian (*re-strike*) dan perhitungan variable dinamik secara real time untuk mendapatkan gambaran tentang daya dukung pondasi tiang tunggal, dari PDA Test menggunakan *Case Method* ini kita dapat mengetahui:

1. Daya dukung pondasi tiang tunggal;
2. Integritas atau keutuhan tiang dan sambungan;
3. Efisiensi dari transfer energi pukulan *hammer*/alat pancang;
4. Displacemet tiang;

Namun untuk pelaksanaannya harus menunggu 28 hari sejak tiang pondasi dipasang karena sudah memiliki kekuatan untuk menahan tekanan dari pukulan *hammer*.

2.5.1 Teori dan Output PDA Test

Pengujian tiang secara dinamis dilakukan dengan menempatkan 2 pasang sensor secara berlawanan. Satu pasang sensor terdiri dari pengukur regangan (*strain transducer*) dan pengukur percepatan (*accelerometer*) yang dipasang dibawah kepala tiang (minimum jarak dari kepala tiang ke transducer $1,5D - 2D$, dimana D adalah diameter tiang) sehingga ada jarak bebas pada saat tumbukan.

Akibat tumbukan *hammer* pada kepala tiang, sensor akan menangkap gerakan yang timbul dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang kemudian di rekam dan diproses dengan *Pile Driving Analyzer* (PDA) model PAX.

Hasil rekaman PDA dianalisa lebih lanjut dengan software CAPWAP. CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) adalah program aplikasi analisa numeric yang menggunakan masukan data gaya (*force*) dan kecepatan (*velocity*) yang diukur oleh PDA.

Kegunaan program ini adalah untuk memperkirakan distribusi dan besarnya gaya perlawanan tanah total sepanjang tiang berdasarkan modelisasi sistem tiang tanah yang dibuat dan memisahkannya menjadi bagian perlawanan dinamis dan statis.

Hasil keluaran (*output*) dari CAPWAP (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006) antara lain:

1. Daya dukung aksial tiang (Ru-ton)

Perkiraan daya dukung aksial tiang (Ru) dilakukan dengan *case method*. Berdasarkan kurva “F” dan “V”, diperkirakan daya dukung aksial tiang yang diuji terdiri dari tahanan ujung (*end bearing*) dan lengketan. Hasil PDA dianalisa lebih lanjut dengan CAPWAP juga menghasilkan distribusi daya dukung tanah sepanjang tiang dan simulai pembebanan static. Kriteria penerimaan hasil dari Ru yaitu Q_u (daya dukung ultimit tiang hasil CPT/SPT) \leq Ru (daya dukung ultimit tiang hasil PDA).

2. Integritas tiang/keutuhan tiang (BTA - %) dan lokasi kerusakan dibawah sensor (LTD – m)

Tabel 2.6 Keutuhan Tiang (BTA - %)

BTA (%)	Penilaian
100%	Tidak Ada kerusakan
80 - 99%	Kerusakan ringan
60 - 79%	Kerusakan serius
< 60%	Patah

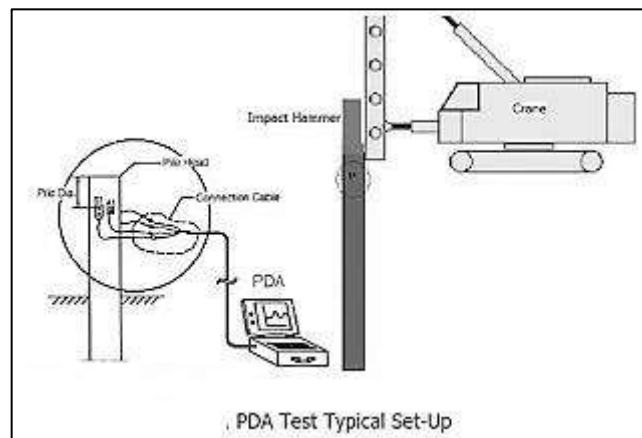
(G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

Tabel 2.7 Output PDA Test

Kode	Keterangan	Satuan
BN	Pukulan	
RMX	Daya dukung tiang	ton
FMX	Gaya tekan maksimum	ton
CTN	Gaya tarik maksimum	ton
EMX	Energi maksimum yang ditransfer	ton.m
DMX	Penurunan maksimum	mm
DFN	Penurunan permanen	mm
STK	Tinggi jatuh palu	m
BPM	Pukulan per menit	
BTA	Nilai keutuhan tiang	%
LE	Panjang tiang dibawah instrument	m
LP	Panjang tiang tertanam	m
AR	Luas penampang tiang	cm ²

(G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

2.5.2 Tujuan PDA Test



Gambar 2.4 PDA Test Typical Set-Up

(ilmubeton.com, 2019)

Mengetahui nilai daya dukung pondasi tunggal integritas atau keutuhan tiang dan *joint* (sambungan pada tiang pancang) efisiensi dari transfer energi *hammer* ke tiang pancang dan sebagainya dari hasil analisa output.

Pengujian dinamis dilaksanakan untuk memperkirakan daya dukung aksial tiang. Karena itu, pemasangan instrument dilakukan sedemikian rupa sehingga pengaruh lentur selama pengujian dapat dihilangkan sebanyak mungkin. Untuk itu harus dilakukan pada pemasangan instrument adalah

strain transducer harus dipasang pada garis netral dan *accelerometer* pada lokasi berlawanan secara diametral serta posisi dari palu pancang harus tegak lurus terhadap garis *strain transducer*. (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

2.5.3 Peralatan Pengujian PDA

1. Pile Driving Analyzer (PDA).
2. 2 Strain Transducer.
3. 2 Accelerometer.
4. Kabel penghubung.
5. Alat bor beton, angkur + baut, dan kunci.

Peralatan dapat dimasukkan dalam kotak perjalanan yang cukup kuat. Setiap set PDA dan perlengkapannya membutuhkan satu atau dua kotak yaitu berukuran sekitar 600 mm x 500 mm x 400 mm, dengan berat sekitar 30kg. (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

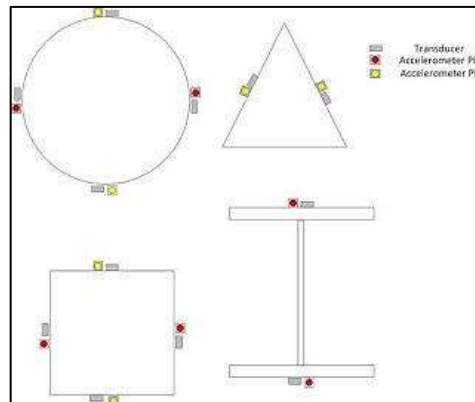


Gambar 2.5 Peralatan Pengujian PDA (*ilmubeton.com*, 2019)

2.5.4 Pemasangan Sensor

Yang diperhatikan pada waktu pemasangan instrument *strain transducer* dan *accelerometer* (minimal 2 buah) adalah posisi pemasangan harus sedemikian rupa sehingga pengaruh lentur (kelentingan) tiang dapat diminimalkan. Sensor dipasang dengan hitungan 1,5 x diameter dari kepala tiang, atau disesuaikan dengan kondisi tiang di lapangan.

Untuk tiang dengan diameter < 1000 mm menggunakan 2 *accelerometer* dan 2 *transducer* dan 1 *main cable*, sedangkan untuk tiang > 1000 mm menggunakan 4 *accelerometer* dan 4 *transducer* dan 2 *main cable*. (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)



Gambar 2.6 Posisi Pemasangan Sensor PDA
(ilmubeton.com, 2019)

2.5.5 Data Riwayat Tiang dan Spesifikasi Tiang

Sebelum pelaksanaan pengujian, data berikut ini harus diberikan kepada penguji PDA, antara lain:

1. Nomor tiang yang akan diuji.
2. Tanggal pemancangan (untuk tiang pancang).
3. Tanggal pengeboran (untuk tiang *borepile*, *wash boring*)
4. Bentuk dan dimensi penampang tiang.
5. Panjang total tiang.
6. Panjang tertanam pondasi tiang.
7. Data sambungan tiang (*joint* untuk pengelasan sambungan tiang).
8. Data *hammer* yang digunakan untuk melaksanakan pengujian PDA.

Sedangkan spesifikasi tiang yang memenuhi syarat untuk melakukan uji PDA Test adalah sebagai berikut:

1. Umur beton sudah mencapai mutu rencana.
2. Umur tiang 5 hari setelah pemancangan/pengeboran.
3. Kepala tiang harus rata dan tidak ada besi tulangan yang terlihat.
4. Harus dilakukan penggalian jika tertanam (d disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan). (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

2.5.6 Prosedur Pekerjaan PDA Test

Prosedur pekerjaan PDA Test adalah sebagai berikut:

1. Melakukan survey tiang yang akan diuji.

2. Menentukan lokasi pemasangan sensor idealnya 1,5x diameter dari kepala tiang atau disesuaikan dengan kondisi tiang di lapangan.
 - ❖ Jika menggunakan 2 *strain transducer* dan 2 *accelerometer* maka harus disiapkan 2 lokasi pemasangan sensor yang saling berhadapan
 - ❖ Jika menggunakan 4 *strain transducer* dan 4 *accelerometer* maka harus disiapkan 4 lokasi pemasangan sensor yang saling berhadapan.
3. Meratakan tempat untuk memasang sensor dengan menggunakan alat grinda tangan dengan luas 10 cm x 10 cm (tiang *Cast in Place*), jumlah meratakan tempat di sesuaikan dengan penggunaan sensor.
4. Membuat tanda pada bagian tiang yang akan dilubangi dengan tanda yang telah disesuaikan lubangnya dengan lubang pada sensor.
5. Melubangi tiang dengan alat bor tangan untuk membuat dudukan sensor, lubang disesuaikan dengan sensor yang dipakai, jumlah lubang disesuaikan dengan penggunaan sensor
 - ❖ Jika menggunakan 2 *strain transducer* dan 2 *accelerometer* maka harus disiapkan 6 lubang
 - ❖ Jika menggunakan 4 *strain transducer* dan 4 *accelerometer* maka harus disiapkan 12 lubang.
6. Setelah lubang selesai dibuat, langkah selanjutnya adalah memasukkan *dyna set* dengan ukuran 1/4" x 8 mm x 25 mm, kemudian masukkan paku *dyna set* ke dalam lubang *dyna set* dan berikan pukulan agar bagian *dyna set* mengikat pada struktur beton.
7. Tempelkan sensor *transducer* dan *accelerometer* sesuai dengan posisi lubang kemudian masukkan baut yang sudah terpasang dengan mur (baut ukuran 1/4" x 200 mm) ke badan sensor dan lubang *dyna set*, kemudia kencangkan dengan kunci pas.

8. Pastikan semua sensor terpasang dengan benar dan kencang, karna kencangan pemasangan sensor sangat berpengaruh pada data yang akan dimonitor.
9. Pasang pelindung sensor,
10. Sambungkan sensor ke *main cable* yang telah tersambung ke komputer PDA.

Pengujian dinamis tiang didasarkan pada analisis gelombang satu dimensi yang terjadi ketika tiang dipukul oleh palu. Regangan dan percepatan selama pemancangan diukur menggunakan *strain transducer* dan *accelerometer*. 2 buah *strain transducer* dan 2 buah *accelerometer* dipasang pada bagian atas dari tiang yang diuji (kira – kira 1,5 x diameter kepala tiang).

Yang diperhatikan pada waktu pemasangan instrument *strain transducer* dan *accelerometer* adalah posisinya yang harus sedemikian rupa sehingga pengaruh lentur (kelentingan) tiang dapat diminimalkan. Karena jika terjadi lenturan (bending) selama pelaksanaan *re-strike*, maka data yang diperoleh akan mengalami distorsi sehingga analisa yang dilakukan tidak akan akurat. (G&P Geotechnics SDN BHD, 2006)

2.6 Analisis Kapasitas Daya Dukung dari Hasil PDA Test

Berdasarkan SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, uji pembebanan dinamik dilakukan pada elevasi *cut-off-level* (COL) atau di atas muka tanah namun dengan perlakuan khusus yang memastikan gaya yang bekerja pada panjang efektif tiang dapat terukur dengan merujuk pada ASTM D4945 (ASTM D4945-12). Uji pembebanan dinamik hanya digunakan sebagai pembandingan dari percobaan beban aksial tekan, dimana harus terdapat minimal 1 tiang yang sama untuk setiap penampang tiang yang diuji statik dan dinamik untuk kemudian hasilnya dikorelasikan.

Jumlah uji pembebanan dinamik pada struktur gedung hanya dibenarkan sebanyak 4x dari 40% dari yang disyaratkan dan 60% tetap harus menggunakan sistem pembebanan statik. Jumlah uji pembebanan dinamik pada struktur jalan dan jembatan atau struktur memanjang lainnya dapat lebih banyak, yaitu pada setiap pilar, abutmen, pile slab, dengan catatan uji pembebanan statik tetap dilakukan

pada area tertentu yang krusial untuk melihat korelasi parameter yang digunakan dalam analisis.

Pada saat pengujian, hammer seberat 1% - 2% dari beban ultimit rencana yang diharapkan akan digunakan untuk dapat memobilisasi kapasitas ultimit tiang dengan kondisi kepala tiang rata dan berupa material uji yang padat.

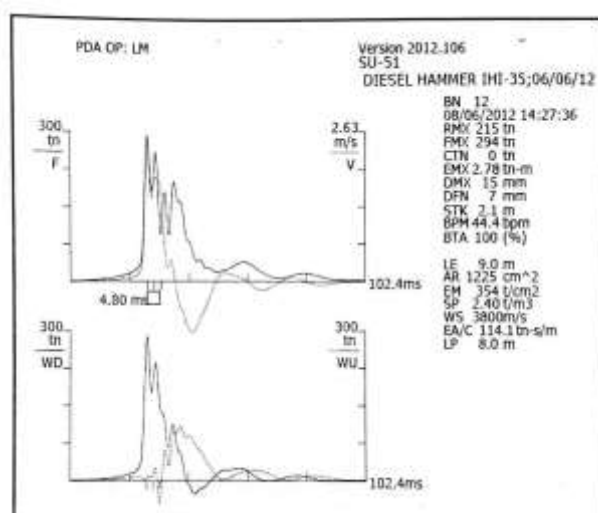
2.6.1 CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*)

Analisa lanjutan yang dilakukan bersama dengan pengujian PDA adalah analisa CAPWAP yang merupakan salah satu metoda signal matching analysis. Analisa ini menggunakan data yang diperoleh dari pengujian PDA untuk memberikan hasil analisa yang lebih detail.

Dari analisa CAPWAP kita akan mengetahui lebih rinci data yang diperoleh dari pengujian PDA Test, dengan tambahan informasi:

- a. Tahanan ujung pondasi tiang tunggal.
- b. Tahanan friksi pondasi tiang tunggal.
- c. Simulasi statik loading test.

Menurut Ir. Hanafiah H.Z.,M.T, 2020, jumlah pondasi tiang yang diuji dengan PDA Test pada umumnya sebanyak 1% dari jumlah titik pondasi tiang dalam satu proyek. Berat/massa hammer ideal untuk pengujian PDA Test adalah 1%-2% dari kapasitas pondasi tiang yang diisyaratkan untuk dicapai.



Gambar 2.7 Tampilan Output Pengujian PDA
(Ir. Hanafiah H.Z.,M.T, 2020)