

TUGAS AKHIR

EVALUASI KEUTUHAN DAN DAYA DUKUNG FONDASI BORED PILE DENGAN CROSSHOLE SONIC LOGGING (CSL), PILE INTEGRITY TEST (PIT) DAN PILE DRIVING ANALYZER (PDA) PADA PROYEK FLY OVER KOPO BANDUNG

*Diajukan Kepada Universitas Sangga Buana (USB) – YPKP
Bandung Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar
Sarjana Strata Satu (S1) Teknik Sipil*

Disusun oleh:

SHILVIA CITRA ADINDA
2112191106



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SANGGA BUANA (USB) - YPKP
BANDUNG
2023**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

**EVALUASI KEUTUHAN DAN DAYA DUKUNG FONDASI
BORED PILE DENGAN CROSSHOLE SONIC LOGGING
(CSL), PILE INTEGRITY TEST (PIT) DAN PILE DRIVING
ANALYZER (PDA) PADA PROYEK FLY OVER KOPO
BANDUNG**

**Disusun Oleh:
Shilvia Citra Adinda
2112191106**

Tugas ini telah diterima dan disahkan sebagai salah satu syarat kelulusan Strata 1 (S1) pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

**Disetujui dan Dan Disahkan
Dosen Pembimbing**

**Ir. H. Chandra Afriade Siregar, S.T, M.T, IPU
NIK: 432.200.167**

**Diketahui,
Ketua Program Studi
Universitas Sangga Buana YPKP**

**Muhammad Syukri, ST., MT
NIK: 432.200.200**

**EVALUASI KEUTUHAN DAN DAYA DUKUNG FONDASI BORED
PILE DENGAN CROSSHOLE SONIC LOGGING (CSL), PILE
INTEGRITY TEST (PIT) DAN PILE DRIVING ANALYZER (PDA)
(STUDI KASUS: JALAN LAYANG KOPO BANDUNG)**

Oleh:

Shilvia Citra Adinda

2112191106

Sebuah Tugas Akhir yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Sangga
Buana YPKP Bandung

© Shilvia Citra Adinda

Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

2023

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Tugas Akhir ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian, dengan
dicetak ulang, di fotocopy atau cara lainnya tanpa ijin penulis.

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini penulis menyatakan bahwa Tugas Akhir ini yang berjudul **“Evaluasi Keutuhan Dan Daya Dukung Fondasi Bored Pile Dengan Crosshole Sonic Logging (Csl), Pile Integrity Test (Pit) Dan Pile Driving Analyzer (Pda) Pada Proyek Fly Over Kopo Bandung”** tidak dapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang pengetahuan penulis juga tidak dapat karya atau pendapat yang dituliskan atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam Tugas Akhir ini sebagaimana disebutkan dalam Daftar Pustaka. Selain itu penulis menyatakan pula, bahwa Tugas Akhir ini dibuat oleh penulis sendiri.

Bandung, Juli 2023
Pembuat Pernyataan

Shilvia Citra Adinda
2112191106

LEMBAR PERSEMBAHAN



Shilvia Citra Adinda
2112191106

Tugas Akhir Ini Saya Persembahkan Untuk:
Yang Terhormat,
Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP
Bandung,
Muhammad Syukri, ST., MT
Dosen Pembimbing Tugas Akhir,
Ir. H. Chandra Afriade Siregar, ST., MT., IPu
Juli 2023

ABSTRAK

Pondasi bor (*bored pile*) merupakan jenis pondasi dalam yang pembuatannya dengan cara cor di tempat (*cast in-situ*). Maka diperlukan struktur yang kuat yaitu dengan perhitungannya daya dukung dan kontrol mutu pekerjaan pengecoran pondasi bor berupa integritas beton menggunakan metode uji *non-destructive* yaitu uji *Pile Integrity Test* (PIT) dan *Crosshole Sonic Logging* (CSL). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan perhitungan dan membandingkan daya dukung pondasi *Bored Pile* Ø1.2m pada P-10 BP-5 dengan menggunakan hasil data sekunder yaitu data *Standart Penetration Test* (SPT) dan *Pile Driving Analyzer* (PDA) di lapangan. Penelitian ini mengambil studi kasus pada Proyek Fly Over Kopo Kota Bandung. Dalam menganalisis daya dukung pondasi *Bored Pile* ini menggunakan metode *Reese & Wright*. Spesifikasi ukuran *Bored Pile* yang dianalisis yaitu Ø1.2m dengan panjang 24m. Berdasarkan data SPT diperoleh hasil daya dukung ujung tiang (Q_p) = 49 ton, sedangkan hasil data PDA diperoleh Q_p = 79 ton. Daya dukung selimut tiang berdasarkan data SPT diperoleh (Q_s) = 1.101 ton, dengan data PDA didapat Q_s = 1.338 ton. Daya dukung ultimit dengan data SPT diperoleh Q_u = 1.151 ton, dengan data PDA didapat Q_u = 1.418 ton. Efisiensi kelompok tiang berdasarkan Metode *Converse-Labarre* berdasarkan data SPT diperoleh Q_g = 12.512 ton, dengan data PDA Q_g = 15.427 ton. Hasil Pengujian PIT menunjukkan integritas beton tiang masuk dalam kategori *undamaged*. Untuk hasil pengujian CSL menunjukkan bahwa integritas beton tiang masuk dalam kategori *Good* (G). Dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel pondasi bor yang dilakukan pengujian PIT dan CSL memiliki integritas beton yang baik.

Kata Kunci : Daya Dukung, Bored Pile, SPT, PDA, Keutuhan Tiang, CSL, PIT

ABSTRACT

Bored pile foundation is a type of in-situ cast foundation created using drilling methods. This requires a strong structure, considering load-bearing capacity and quality control during concrete casting. Non-destructive testing methods like Pile Integrity Test (PIT) and Crosshole Sonic Logging (CSL) are used to assess concrete integrity. The purpose of this study is to calculate and compare the load-bearing capacity of Ø1.2m Bored Piles at P-10 BP-5 using secondary data from Standard Penetration Test (SPT) and Pile Driving Analyzer (PDA) in the field. This research focuses on the Fly Over Kopo Project in Bandung City. Reese & Wright method is employed to analyze the load-bearing capacity. The analyzed Bored Pile specification is Ø1.2m with a length of 24m. Based on SPT data, end bearing capacity (Q_p) = 49 tons, while PDA data yields Q_p = 79 tons. Skin friction capacity based on SPT data is (Q_s) = 1.101 tons, and with PDA data Q_s = 1.338 tons. Ultimate capacity with SPT data is Q_u = 1.151 tons, and with PDA data Q_u = 1.418 tons. Group efficiency using the Converse-Labarre method shows Q_g = 12.512 tons from SPT data, and Q_g = 15.427 tons from PDA data. PIT testing results indicate undamaged concrete integrity. CSL testing shows Good (G) concrete integrity. In conclusion, all tested bored pile foundation samples, using PIT and CSL testing, exhibit good concrete integrity.

Keywords: Load-Bearing Capacity, Bored Pile, SPT, PDA, Pile Integrity, CSL, PIT

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala kebaikannya, karena atas rahmat dan berkatNya laporan Tugas Akhir yang berjudul **“EVALUASI KEUTUHAN DAN DAYA DUKUNG FONDASI BORED PILE DENGAN CROSSHOLE SONIC LOGGING (CSL), PILE INTEGRITY TEST (PIT) DAN PILE DRIVING ANALYZER (PDA) PADA PROYEK FLY OVER KOPO BANDUNG”** dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir ini diajukan sebagai salah satu syarat akademis dalam menyelesaikan pendidikan tingkat sarjana untuk (Strata- 1) Teknik Sipil di Universitas Sangga Buana YPKP Bandung. Segala daya dan upaya penulis lakukan demi terselesainya Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya, walaupun penyusunan ini masih sangat jauh dari kata sempurna, untuk itu penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun dari pembaca untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Saya menyadari bahwa dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan, bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua Orang Tua yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan serta dorongan baik moril, spiritual, maupun materil.
2. Dr. Didin Saepudin, SE., M.Si selaku Rektor Universitas Sangga Buana YPKP-Bandung.
3. Dr. Teguh Nurhadi Suharsono, ST., MT selaku Wakil Rektor I Universitas Sangga Buana YPKP– Bandung.
4. Bambang Susanto, SE., M.Si, selaku Wakil Rektor II Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung.
5. Nurhaeni Sikki, S.A.P., M.A.P selaku Wakil Rektor III Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung.
6. Slamet Risnanto, ST., M.Kom. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.

7. Muhammad Syukri, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung.
8. Ir. H. Chandra Afriade Siregar, ST., MT. Selaku Wali Dosen sekaligus Dosen pembimbing Tugas Akhir.
9. Drs. Rosadi, MT selaku Kepala Laboratorium Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP – Bandung
10. Seluruh Civitas akademik Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung
11. Rekan-rekan seangkatan yang senantiasa saling mendukung dalam penyusunan laporan ini.

Akhir kata saya sebagai penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya. Saya menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saya menerima kritik dan saran yang bersifat membangun dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata saya mengucapkan terima kasih dan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, Maret 2023

Shilvia Citra Adinda
2112191106

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pondasi Bored Pile	4
2.1.1 Penyaluran Beban Pada Pondasi <i>Bored Pile</i>	6
2.1.2 Daya Dukung <i>Bored Pile</i>	7
2.1.3 Faktor Aman.....	7
2.1.4 Daya Dukung <i>Bored Pile</i> Dari Hasil SPT.....	8
2.1.5 Daya Dukung Lateral Pondasi <i>Bored Pile</i>	11
2.1.6 Metode Broms	14
2.1.7 Kapasitas Dan Efisiensi Pondasi <i>Bored Pile</i>	23
2.1.8 Penurunan Pondasi <i>Bored Pile</i>	27
2.2 Pile Integrity Test (PIT)	29
2.2.1 Perangkat Pengujian	30
2.2.2 Perambatan Gelombang Pada Pondasi Tiang	34
2.2.3 Hasil Uji PIT	35
2.3 Crosshole Sonic Logging (CSL).....	37
2.3.1 Perangkat Pengujian	38
2.3.2 Perambatan Gelombang Uji <i>Sonic Logging</i>	42
2.3.3 Hasil Uji CSL	43
2.4 Pile Driving Analyzer (PDA)	44
BAB III METODE PENELITIAN	51
3.1 Data Umum Proyek.....	51

3.2	Data Teknis <i>Bored Pile</i>	52
3.3	Metode Pengumpulan Data	53
3.4	Analisis Data	53
3.5	Flowchart Metode Penelitian.....	54
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Pendahuluan	55
4.2	Menghitung Kapasitas Daya Dukung <i>Bored Pile</i>	56
4.2.1	Menghitung Daya Dukung <i>Bored Pile</i> Berdasarkan Data SPT.....	56
4.2.2	Daya Dukung <i>Bored Pile</i> Berdasarkan Hasil PDA.....	62
4.2.3	Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Aksial Kelompok.....	64
4.3	Hasil Pengujian CSL	68
4.4	Hasil Pengujian PIT	70
BAB V PENUTUP		74
5.1	Kesimpulan	74
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77
LAMPIRAN.....		1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis-Jenis Bored Pile	4
Gambar 2. 2 Pondasi Bored Pile Ditinjau Dari Cara Menyalurkan Bebannya.....	6
Gambar 2. 3 Daya Dukung Ujung Bored Pile Pada Tanah Pasir	9
Gambar 2. 4 Tahanan Geser Selimut Bored Pile Pada Tanah Non Kohesif	10
Gambar 2. 5 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi (a) Pondasi Tiang Pendek, (b) Pondasi Tiang Panjang	16
Gambar 2. 6 Nilai Lateral H_u Untuk Tiang Bebas Maupun Tiang Jepit Pada Tanah Kohesif	17
Gambar 2. 7 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Kepala Tiang Jepit Akibat Beban Lateral Pada Tanah Kohesif	18
Gambar 2. 8 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Kepala Tiang Bebas Akibat Beban Lateral Pada Tanah Granular	20
Gambar 2. 9 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Tiang Jepit Akibat Beban Lateral Pada Tanah Granular (a) Pondasi Tiang Pendek, (b) Pondasi Tiang Panjang	21
Gambar 2. 10 Grafik H_u Untuk Tiang Jepit Maupun Tiang Bebas Pada Tanah Non-Kohesif.....	22
Gambar 2. 11 Jarak Antar Tiang Dalam Kelompok.....	23
Gambar 2. 12 Susunan Jarak Antar Tiang Dalam Kelompok	24
Gambar 2. 13 Mekanisme Keruntuhan Pondasi Bored Pile (Kiri Tiang Tunggal, Kanan Kelompok Tiang).....	25
Gambar 2. 14 Jarak Tiang (s)	26
Gambar 2. 15 Bentuk Unit Tahanan Friksi	28
Gambar 2. 16 Pile Integrity Test	29
Gambar 2. 17 Akselerometer.....	31
Gambar 2. 18 Hammer	32
Gambar 2. 19 PIT Collector	32
Gambar 2. 20 Pile Placement Pile Integrity Test.....	33

Gambar 2. 21 Skema Pemasangan Alat PIT	34
Gambar 2. 22 Grafik Hasil Uji PIT	36
Gambar 2. 23 Skematik Pengujian CSL.....	38
Gambar 2. 24 Alat Pengujian CSL	39
Gambar 2. 25 Pengujian CSL.....	41
Gambar 2. 26 Grafik Hasil Uji CSL.....	43
Gambar 2. 27 Tampilan CAPWAP	46
Gambar 2. 28 Alat Uji PDA	47
Gambar 2. 29 Grafik Hasil Uji PDA	47
Gambar 3. 1 Letak Proyek Secara Umum	51
Gambar 3. 2 Flowchart Penelitian	54
Gambar 4. 1 Hasil PDA	63
Gambar 4. 2 Denah Lokasi Tiang.....	64
Gambar 4. 3 Grafik Hasil Crosshole Sonic Logging (CSL).....	69
Gambar 4. 4 Grafik Hasil CSL Titik 2.A	70
Gambar 4. 5 Hasil Grafik Uji PIT	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Korelasi NSPT Dengan Berat Jenis Tanah Pasir.....	10
Tabel 2.2 Korelasi NSPT Dengan Berat Jenis Tanah Lempung	11
Tabel 2.3 Hubungan Modulus Subgrade (k_1) Dengan Kuat Geser Undrained Untuk Lempung Kaku Terkonsolidasi Berlebihan (Overconsolidation)	13
Tabel 2.4 Nilai - Nilai n_h Untuk tanah Granular ($c=0$)	13
Tabel 2.5 Nilai- Nilai n_h Untuk Tanah Kohesif.....	14
Tabel 2.6 Kriteria Pondasi Tiang Pendek dan Pondasi Tiang Panjang	14
Tabel 2.7 Klasifikasi Hasil Uji PIT Terhadap Perubahan Impedansi.....	37
Tabel 2.8 Jumlah Kombinasi Pengujian CSL	40
Tabel 2.9 Klasifikasi Tingkat Kondisi Berdasarkan Uji CSL	43
Tabel 2.10 Karakteristik Hasil Pengujian Crosshole Sonic Logging (CSL)	44
Tabel 2.11 Kode dan Keterangan Pada Alat PDA	48
Tabel 4.1 Statigrafi Lapisan Tanah Berdasarkan Nilai N-SPT	56
Tabel 4.2 Daya Dukung Tiang Tunggal Bored Pile P-10 berdasarkan data SPT	61
Tabel 4.3 Energi Hammer & Tegangan.....	62
Tabel 4.4 Daya Dukung Bored Pile Berdasarkan Tes PDA	62
Tabel 4.5 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Bored Pile P-10 BP-5 Kedalaman 24m	64
Tabel 4.6 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang Bored Pile P-10 BP-5 Kedalaman 24m	66
Tabel 4.7 Hasil Uji PIT	70

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bangunan struktur gedung sipil terdiri dari struktur atas dan struktur bawah. Bangunan struktur atas terdiri dari konstruksi kolom, balok, plat, dll. Sedangkan untuk struktur bawah terdiri dari konstruksi pondasi. Pondasi adalah struktur bagian bawah bangunan yang berhubungan langsung dengan tanah, atau bagian bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah yang mempunyai fungsi memikul beban bagian bangunan lain di atasnya. (Bowles, 1982)

Pondasi merupakan unsur yang sangat penting dalam suatu bangunan, baik itu gedung tinggi, bangunan industri maupun jembatan. Suatu bangunan akan mengalami kegagalan jika pondasi yang direncanakan tidak memenuhi persyaratan meskipun struktur atasnya telah direncanakan dengan baik, dikarenakan pondasi merupakan bagian dari struktur yang berfungsi meneruskan beban struktur atas ke lapisan tanah yang mempunyai daya dukung aman. Struktur pondasi dapat memikul bangunan dengan aman dengan syarat pondasi tidak boleh mengalami keruntuhan daya dukung maupun kegagalan struktur. Keruntuhan daya dukung dalam hal ini adalah pondasi tidak boleh mengalami penurunan yang dapat membahayakan struktur yang dipikulnya serta tanah yang terbebani tidak mengalami keruntuhan. Sedangkan kegagalan struktur yang dimaksud dalam hal ini adalah bahan yang digunakan untuk menyalurkan beban bangunan harus cukup kuat dan tidak mengalami kerusakan bahan. Hal ini dikenal dengan keutuhan (*integrity*) bahan.

Pada sekitar tahun 80-an, para ahli berusaha mencari teknologi pengajuan pelaksanaan uji beban dan uji keruntuhan bahan pada fondasi yang ekonomis, praktis dan tidak merusak struktur fondasi. Kemudian diperkenalkan teknik uji keruntuhan tiang beton yang tidak merusak (non destruktif) struktur tiang, yaitu teknik uji integritas tiang atau *pile integrity test* (PIT) dan *Crosshole Sonic Logging* (CSL) untuk mendapatkan data

kerusakan fondasi. Sedangkan untuk uji kapasitas atau daya dukung tiang diperkenalkan metode untuk menentukan kelayakan tiang fondasi yaitu *Pile Driving Analyzer (PDA)*.

1.2 Perumusan Masalah

Dari latar belakang dapat dirumuskan suatu permasalahan, sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mengetahui keutuhan/ kelayakan pada tiang bor menggunakan *Crosshole Sonic Logging*
2. Bagaimana cara mengetahui integritas tiang bor dengan *Pile Integrity Test*
3. Bagaimana hasil evaluasi integritas/ keutuhan dan penurunan tiang bor dari hasil *Pile Driving Analyzer Test*

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengetahui cara mengetahui keutuhan/ kelayakan pada tiang bor menggunakan *Crosshole Sonic Logging*
2. Mengetahui cara mengetahui integritas tiang bor dengan *Pile Integrity Test*
3. Mengetahui hasil evaluasi integritas/ keutuhan dan penurunan tiang bor dari hasil *Pile Driving Analyzer Test*

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah Tugas Akhir ini adalah:

1. Penelitian ditinjau pada Proyek Jalan Layang Kopo, Bandung
2. Bored Pile material beton dengan diameter 1,2 m
3. Pengujian *Bored Pile* dengan CSL pada titik P9-BP14
4. Pengujian *Bored Pile* dengan PIT dan PDA pada titik P10-BP5
5. ASTM D-6760-08 *Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundation by Ultrasonic Crosshole Testing*.
6. ASTM D-5882-07 *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*
7. ASTM D-4945 *Standart Tset Method for High-Strain Dynamic Testing Of Deep Foundations*

1.5 Manfaat

Tugas Akhir ini diharapkan bermanfaat untuk:

1. Menerapkan metode atau ilmu yang diperoleh selama perkuliahan dan melatih untuk menganalisa permasalahan serta mencari penyelesaiannya.
2. Pihak-pihak atau mahasiswa yang akan membahas hal yang sama.
3. Pihak-pihak yang membutuhkan informasi dalam Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah dalam melakukan analisis terhadap permasalahan yang ada, perlu dilakukan sistematika penulisan yang disusun sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi informasi awal dari keseluruhan penelitian ini, yang berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat, serta sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi dasar teori, rumus, dan segala sesuatu yang digunakan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang diperoleh dari buku literatur, tulisan ilmiah, dan hasil penulisan sebelumnya.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini berisi metode penulisan Tugas Akhir berupa pengumpulan data dan metode analisis.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

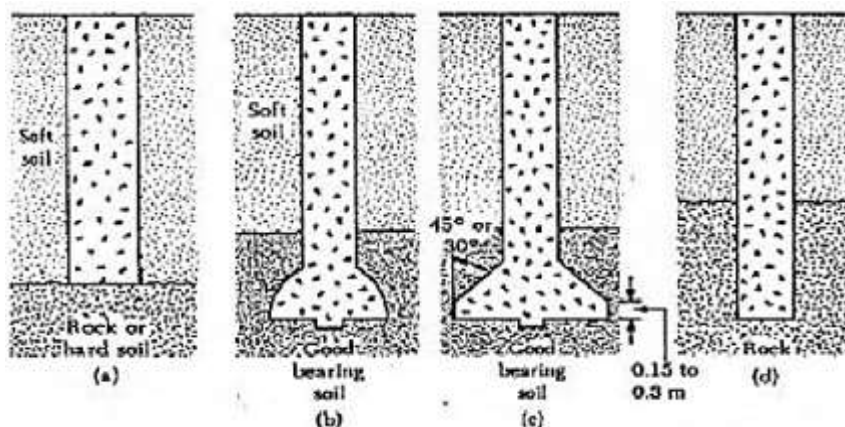
2.1 Pondasi Bored Pile

Pondasi *Bored Pile* merupakan salah satu jenis pondasi tiang yang biasa digunakan pada konstruksi bangunan tinggi. Pemakaian pondasi *Bored Pile* merupakan alternatif lain, apabila dalam pelaksanaan pembangunan berada pada suatu lokasi yang sangat sulit atau beresiko tinggi apabila mempergunakan pondasi tiang pancang.

Dari sisi teknologi, pemakaian pondasi *Bored Pile* ini memiliki beberapa keunggulan, antara lain mobilisasi yang mudah, karena pondasi dicetak di tempat dan hanya membutuhkan alat boring serta perakitan tulangan, tidak mengganggu lingkungan atau bangunan di sekitarnya karena tidak menghasilkan getaran yang dapat merusak bangunan lain di sekitarnya.

Pondasi *Bored Pile* diklasifikasikan sesuai dengan rancangan untuk meneruskan beban struktur ke lapisan tanah keras. Jenis-jenis pondasi *Bored Pile* adalah sebagai berikut, dan dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.

1. *Bored Pile* lurus untuk tanah keras.
2. *Bored Pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk bel.
3. *Bored Pile* yang ujungnya diperbesar berbentuk trapesium.
4. *Bored Pile* lurus untuk tanah berbatu-batuan.



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Bored Pile (Sumber: Das, 1995)

Ada beberapa keuntungan dalam pemakaian pondasi *Bored Pile* jika dibandingkan dengan tiang pancang (Das, 2019), yaitu:

1. Sebuah *Bored Pile* tunggal dapat digunakan sebagai pengganti sekelompok tiang dan *pile cap*.
2. Pemasangan *Bored Pile* dalam timbunan pasir padat dan kerikil lebih mudah daripada pemasangan tiang pancang dalam timbunan pasir padat dan kerikil.
3. Pemasangan tidak menimbulkan gangguan suara dan getaran yang membahayakan bangunan sekitarnya.
4. Mengurangi kebutuhan beton dan tulangan dowel pada pelat penutup tiang (*pile cap*). Kolom dapat secara langsung diletakkan di puncak *Bored Pile*.
5. Kedalaman tiang dapat divariasikan.
6. Tanah dapat diperiksa dan dicocokkan dengan data laboratorium.
7. Konstruksi *Bored Pile* lebih ekonomis karena tidak memerlukan lebih banyak alat berat.
8. Diameter tiang memungkinkan dibuat besar, bila perlu ujung bawah tiang dapat dibuat lebih besar guna mempertinggi kapasitas dukungnya.
9. Tidak ada risiko kenaikan muka tanah.

Terdapat pula beberapa kelemahan dalam pemakaian pondasi *Bored Pile* jika dibandingkan dengan tiang pancang (Das, 2019), yaitu:

1. Pengecoran *Bored Pile* dipengaruhi kondisi cuaca
2. Pengecoran beton agak sulit bila dipengaruhi air tanah karena mutu beton tidak dapat dikontrol dengan baik.
3. Mutu beton hasil pengecoran bila tidak terjamin keseragamannya di sepanjang badan *Bored Pile* mengurangi kapasitas dukung *Bored Pile*.
4. Air yang mengalir ke dalam lubang bor dapat mengakibatkan gangguan tanah, sehingga mengurangi kapasitas dukung tiang.
5. Pemasangan *temporary casing* untuk mencegah terjadinya kelongsoran.

2.1.1 Penyaluran Beban Pada Pondasi *Bored Pile*

Berdasarkan cara penyaluran bebannya ke tanah, pondasi bored pile dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu:

1. Pondasi tiang dengan tahanan ujung (end bearing pile)

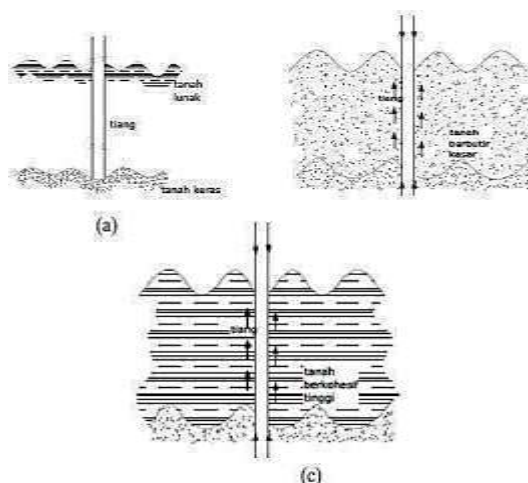
Tiang ini akan meneruskan beban melalui tahanan ujung tiang ke lapisan tanah pendukung. Umumnya tiang dukung ujung berada dalam zona tanah yang lunak yang berada diatas tanah keras. Tiang-tiang dipancang sampai mencapai batuan dasar atau lapisan keras lain yang dapat mendukung beban yang diperkirakan tidak mengakibatkan penurunan berlebihan.

2. Pondasi tiang dengan tahanan gesek (friction pile)

Jenis tiang ini akan meneruskan beban ke tanah melalui gesekan antara tiang dengan tanah di sekelilingnya. Bila butiran tanah sangat halus tidak menyebabkan tanah di antara tiang-tiang menjadi padat, sedangkan bila butiran tanah kasar maka tanah di antara tiang akan semakin padat.

3. Pondasi tiang dengan tahanan lekatan (*adhesive pile*)

Dalam daya dukung pondasi tiang, pentransferan beban juga terjadi pada pondasi tiang, dimana terjadi pentransferan beban *friction* (gesekan) dan pentransferan beban *end bearing* (tahanan ujung).



Gambar 2. 2 Pondasi Bored Pile Ditinjau Dari Cara Menyalurkan Bebannya
(Sumber: Hardiyatmo, 2010)

2.1.2 Daya Dukung *Bored Pile*

Kapasitas dukung ijin pondasi tiang untuk beban aksial Q_a atau Q_{all} diperoleh dengan membagi daya dukung ultimit Q_u atau Q_{ult} dengan suatu faktor keamanan (SF) baik secara keseluruhan maupun secara terpisah dengan menerapkan faktor keamanan keamanan pada daya dukung selimut tiang dan pada tahanan ujungnya. Kapasitas dukung tiang adalah kemampuan atau kapasitas tiang dalam mendukung beban. Jika satuan yang digunakan dalam kapasitas dukung pondasi dangkal adalah satuan tekanan (kPa), maka dalam kapasitas dukung tiang satuannya adalah satuan gaya (kN).

Dalam beberapa literatur digunakan istilah *pile capacity* atau *pile carryong capacity*. Karena itu daya dukung ijin tiang dapat dinyatakan seperti dalam rumus berikut:

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Q_u = Q_p + Q_s \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan:

- Q_a = Kapasitas dukung ijin tiang (ton)
- Q_u = Kapasitas dukung ultimate tiang (ton)
- FS = Faktor keamanan
- Q_p = Daya dukung ujung tiang (ton)
- Q_s = Daya dukung friksi (ton)

2.1.3 Faktor Aman

Untuk memperoleh kapasitas ijin tiang, maka diperoleh untuk membagi kapasitas ultimit dengan factor aman tertentu.

- Untuk dasar tiang yang dibesarkan dengan $d < 2$ m

$$Q_a = \frac{Q_u}{2,5}$$

- Untuk dasar tiang tanpa pembesaran di bagian bawah

$$Q_a = \frac{Q_u}{2}$$

2.1.4 Daya Dukung *Bored Pile* Dari Hasil SPT

Standard Penetration Test (SPT) adalah sejenis percobaan dinamis dengan memasukan suatu alat yang dinamakan split spoon kedalam tanah. Dengan percobaan ini akan diperoleh kepadatan relative (*relative density*), sudut geser tanah (ϕ) berdasarkan nilai jumlah pukulan (N).

Perkiraan daya dukung pondasi *Bored Pile* pada tanah pasir dan silt didasarkan pada data uji lapangan SPT, berikut adalah metode untuk menghitung daya dukung berdasarkan data SPT dengan metode *Reese & Wreight* (1997).

1. Daya dukung ujung pondasi *Bored Pile* (*end bearing*)

$$Q_p = q_p \times A_p \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan:

Q_p = tahanan ujung per satuan luas (ton/m²)

A_p = luas penampang pondasi (m²)

Untuk tanah kohesif:

$$q_p = 9 C_u \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$C_u = \frac{2}{3} N_{SPT} 10 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan:

C_u = kohesi tanah *undrained* (ton/m²)

Untuk tanah non kohesif:

$$Q_p = \frac{40}{0,3048^2} A_p \text{ untuk } N_{SPT} > 60 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

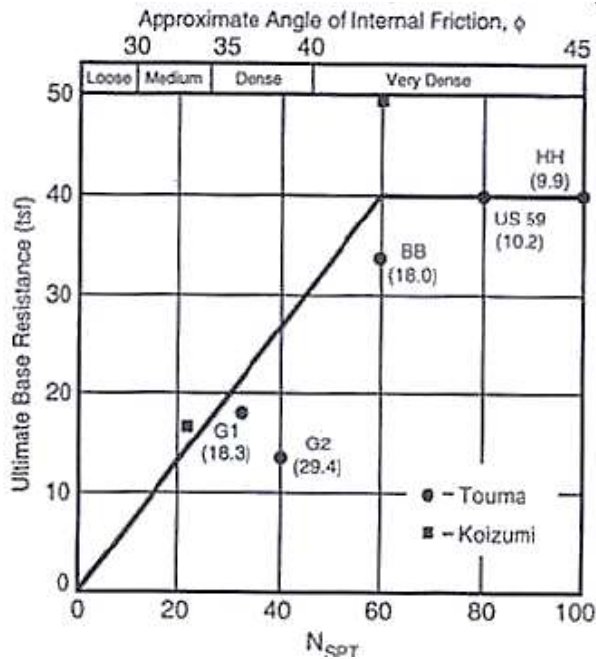
$$Q_p = \frac{2}{3} \times \frac{1}{0,3048^2} N A_p \text{ untuk } N_{SPT} \leq 60 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan:

A_p = luas penampang pondasi (m²)

N = nilai N_{SPT} tanah

Untuk tanah non kohesif, *Reese and Wright* (1977) mengusulkan korelasi antara q_p dan N-SPT seperti terlihat pada **Gambar 2.3** dibawah.



Gambar 2.3 Daya Dukung Ujung Bored Pile Pada Tanah Pasir

2. Daya dukung selimut (Q_s)

Untuk tanah kohesif:

$$Q_s = C_u \times \alpha \times p \times \Delta l \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan:

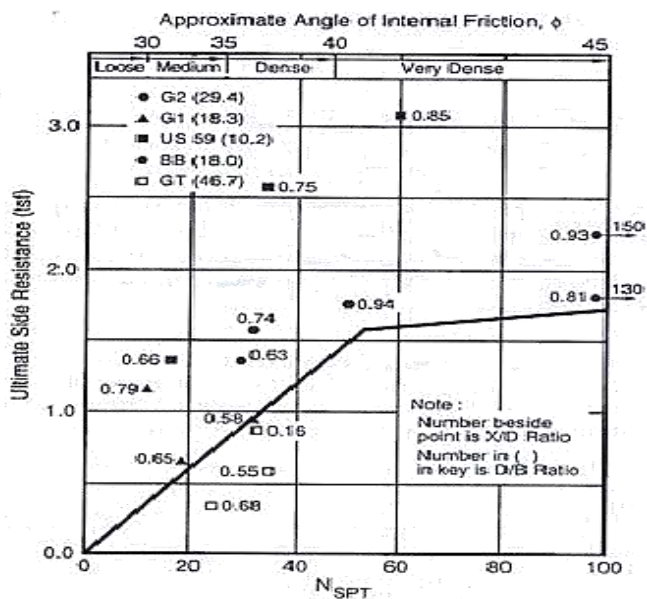
- α = faktor koreksi
- p = keliling pondasi *Bored Pile* (m)
- Δl = kedalaman tiang yang ditinjau (m)

Untuk tanah non kohesif:

$$Q_s = 0,32 \times N \times p \times \Delta l \text{ untuk } N_{SPT} < 53 \dots\dots\dots (2.9)$$

$$Q_s = \frac{N-53}{450} \times \frac{1}{0,3048^2} \times p \times \Delta l \text{ untuk } N_{SPT} \geq 53 \dots\dots\dots (2.10)$$

Untuk tanah non kohesif, $N < 53$ maka $f_s = 0,32 \text{ NSPT}$ (Ton/m²). Untuk $53 < N < 100$ maka f diperoleh dari korelasi langsung dengan NSPT (*Reese and Wright, 1977*) mengenai tahanan geser seperti terlihat pada **Gambar 2.4** berikut.



Gambar 2. 4 Tahanan Geser Selimut Bored Pile Pada Tanah Non Kohesif

(Sumber: Reese and Wright, 1977)

Adapun korelasi NSPT untuk menentukan berat jenis tanah (γ) adalah sebagai berikut.

1. Tanah pasir (non kohesif)

Tanah pasir adalah tanah yang bergradasi seragam dan mudah dilalui oleh rembesan air. Korelasi NSPT dengan berat jenis tanah pasir dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut.

Tabel 2.1 Korelasi NSPT Dengan Berat Jenis Tanah Pasir

NSPT	Kepadatan Relatif (D_r) (%)		Berat Jenis (γ)	
			Moist (pcf)	Submerged (pcf)
< 4	< 20	Very Loose	< 100	< 60
4 – 10	20 – 40	Loose	95 – 125	55 - 65
10 – 30	40 – 60	Medium	110 – 125	60 - 70
30 – 50	60 – 80	Dense	110 – 140	65 - 85
> 50	> 80	Very Dense	> 130	> 75

(Sumber: Meyerhoff, 1956)

2. Tanah lempung (kohesif)

Tanah lempung adalah tanah yang sulit menyerap air. Korelasi NSPT dengan berat jenis tanah lempung (γ) dapat dilihat pada **Tabel 2.2** berikut.

Tabel 2.2 Korelasi NSPT Dengan Berat Jenis Tanah Lempung

<i>Consistency</i>	Q_u (pcf)	NSPT	<i>Saturated Unit Weight</i> (pcf)
<i>Very Soft</i>	0 - 500	0 - 2	< 100
<i>Soft</i>	500 - 1000	3 - 4	100 - 120
<i>Medium</i>	1000 - 2000	5 - 8	110 - 125
<i>Stiff</i>	2000 - 4000	9 - 16	115 - 130
<i>Very Stiff</i>	4000 - 8000	16 - 32	120 - 140
<i>Hard</i>	> 8000	> 32	> 130

2.1.5 Daya Dukung Lateral Pondasi *Bored Pile*

Pondasi tiang terkadang harus menahan beban lateral (horizontal), seperti beban gempa dan beban lainnya. Beban-beban tersebut akan bekerja pada ujung atas (kepala tiang). Hal ini akan menyebabkan kepala tiang terdeformasi ke arah lateral dan akan menimbulkan gaya geser pada tiang dan tiang akan melentur sehingga timbul momen lentur. Gaya geser yang dipikul tiang harus mampu didukung oleh tampang tiang sesuai dengan bahan yang dipakai. Besarnya gaya geser dapat dianggap terbagi rata ke seluruh tiang. Selain kapasitas dukung tiang perlu juga ditinjau terhadap kapasitas dukung tanah di sekitarnya. Keruntuhan yang mungkin terjadi karena keruntuhan tiang, dan dapat pula karena keruntuhan tanah di sekitarnya. Jika tanah cukup keras maka keruntuhan akan terjadi pada tiang karena kapasitas lentur tiang terlampaui. Sedangkan jika tiang cukup kaku (pendek) maka keruntuhan yang akan terjadi akibat terlampauinya kapasitas dukung tanah.

Dalam analisis gaya lateral, model ikatan tiang dengan pelat penutup

tiang perlu diperhatikan karena sangat mempengaruhi kelakuan tiang dalam mendukung beban lateral. Sehubungan dengan hal tersebut, tiang-tiang dibedakan menurut dua tipe, yaitu:

1. Tiang ujung bebas (*free end pile*)

Tiang ujung bebas didefinisikan sebagai tiang yang bagian atasnya tidak terjepit ke dalam pelat penutup kepala tiang.

2. Tiang ujung jepit (*fixed end pile*)

Tiang ujung jepit didefinisikan sebagai tiang yang ujung atasnya terjepit (tertanam) dalam pelat penutup kepala tiang.

Untuk menentukan tiang termasuk tiang panjang atau tiang pendek perlu diketahui faktor kekakuan tiang, yaitu dengan menghitung faktor-faktor kekakuan R dan T. Faktor-faktor tersebut dipengaruhi oleh kekakuan tiang (EI) dan kompresibilitas tanah yang dinyatakan dalam modulus tanah (K) yang tidak konstan untuk sembarang tanah, tapi tergantung pada lebar dan kedalaman tanah yang dibebani. Faktor kekakuan untuk modulus tanah lempung (R) dinyatakan oleh persamaan berikut.

$$R = \sqrt[4]{\frac{EI}{K}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan:

K = modulus tanah = $k_h \cdot d = \frac{k_1}{1,5}$

K1 = modulus reaksi *subgrade* dari Terzaghi

E = modulus elastis tiang (kN/m²)

I = momen inersia tiang (cm⁴)

Nilai-nilai k1 yang disarankan oleh Terzaghi (1955), ditunjukkan dalam **Tabel 2.3.**

Pada kebanyakan lempung terkonsolidasi normal (*normally consolidated*) dan tanah granular, modulus tanah dapat dianggap bertambah secara linier dengan kedalamannya. Faktor kekakuan untuk modulus tanah granular dinyatakan oleh persamaan:

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{nh}} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan:

n_h = modulus reaksi *subgrade* horizontal

Koefisien variasi modulus (n_h) diperoleh Terzaghi secara langsung uji beban tiang dalam tanah pasir yang terendam air. Nilai-nilai n_h yang disarankan oleh Terzaghi ditunjukkan dalam **Tabel 2.3**. Dalam tabel tersebut dicantumkan juga nilai-nilai n_h yang disarankan oleh Reese dkk (1956). Nilai-nilai n_h yang lain, ditunjukkan dalam **Tabel 2.4**.

Tabel 2.3 Hubungan Modulus Subgrade (k_1) Dengan Kuat Geser Undrained Untuk Lempung Kaku Terkonsolidasi Berlebihan (Overconsolidation)

Konsistensi	Kaku	Sangat Kaku	Keras
Kohesi <i>Undrained</i> C_u			
kN/m^2	100-200	200-400	>400
kg/cm^2	1-2	2-4	>4
k_1			
MN/m^3	18-36	36-72	>72
kg/cm^3	1,8-3,6	3,6-7,2	>7,2
k_1 direkomendasikan			
MN/m^3	27	54	>108
kg/cm^3	2,7	5,4	>10,8

Tabel 2.4 Nilai - Nilai n_h Untuk tanah Granular ($c=0$)

Kerapatan Relatif (D_r)	Tidak Padat	Sedang	Padat
Interval nilai A	100 – 300	300- 1000	1000 – 2000
Nilai A dipakai	200	600	1500
n_h pasir kering atau lembab (Terzaghi) (kN/m^3)	2425	7275	19400
N_h pasir terendam air (kN/m^3)			
Terzaghi	1386	4850	11779
Reese dkk	5300	16300	34000

(Sumber: Tomlinson, 1977)

Tabel 2.5 Nilai- Nilai n_h Untuk Tanah Kohesif

Tanah	n_h (kN/cm ³)	Referensi
Lempung terkosolidasi normal lunak	166-3518	Reese dan Matlock (1956)
	277-554	Davisson – Prakash (1963)
Lempung terkonsolidasi normal organik	111-277	Peck dan Davidson (1962)
	111-831	Davidson (1970)
Gambut	55	Davidson (1970)
	27,7-111	Wilson dan Hiltz (1967)
Loss	8033-11080	Bowles (1968)

(Sumber: Hardiyatmo, 2011)

Dari nilai-nilai faktor kekakuan R dan T yang telah dihitung, (Tomlinson 1977) mengusulkan kriteria tiang kaku atau disebut tiang pendek (tiang kaku) dan tiang panjang (tiang tidak kaku) yang dikaitkan dengan panjang tiang yang tertanam dalam tanah (L), seperti yang ditunjukkan dalam **Tabel 2.6**.

Batasan ini digunakan untuk menghitung defleksi tiang akibat gaya horizontal.

Tabel 2.6 Kriteria Pondasi Tiang Pendek dan Pondasi Tiang Panjang

Tipe Tiang	Modulus Tanah (K) Bertambah dengan Kedalaman	Modulus Tanah (K) Konstan
Kaku	$L \leq 2T$	$L \leq 2R$
Tidak Kaku	$L \geq 4T$	$L \geq 3,5R$

(Sumber: Tomlinson, 1977)

2.1.6 Metode Broms

Metode perhitungan ini menggunakan teori tekanan tanah yang disederhanakan dengan menganggap bahwa sepanjang kedalaman tiang, tanah mencapai nilai ultimit.

Beberapa kelebihan metode Broms:

1. Dapat digunakan pada tiang panjang maupun tiang pendek

2. Dapat digunakan pada kondisi kepala tiang terjepit maupun bebas.

Kekurangan metode Broms:

1. Hanya berlaku untuk lapisan tanah yang homogeny, yaitu tanah lempung saja atau tanah pasir saja
2. Tidak dapat digunakan pada tanah berlapis

Broms membedakan antara tiang pendek dan panjang serta membedakan posisi kepala tiang bebas dan terjepit. Broms, 1964, mengemukakan beberapa anggapan dalam metode ini bahwa tanah adalah salah satu dari non-kohefif saja ($c=0$) atau kohefif saja ($f=0$), oleh karena itu, tiang pada setiap tipe tanah dianalisis secara terpisah.

Broms juga menyatakan bahwa tiang pendek kaku (*short rigid pile*) dan tiang panjang lentur (*long flexible pile*) dianggap terpisah. Tiang dianggap tiang pendek kaku jika $L/T \leq 2$ atau $L/R \leq 2$ dan dianggap tiang panjang lentur jika $L/T \geq 4$ atau $L/R \geq 3,5$.

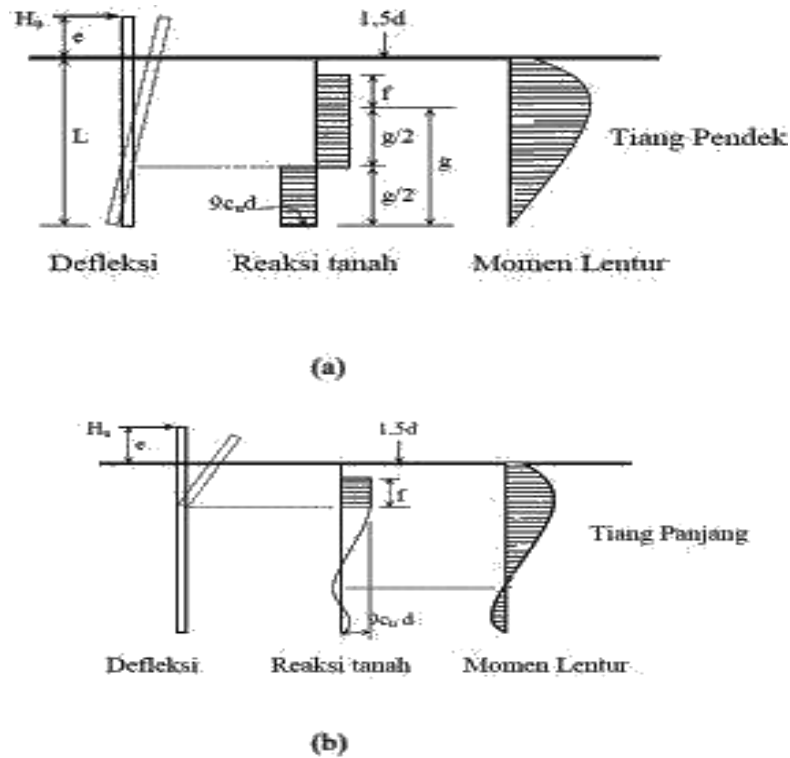
1. Pada tanah kohefif

Pada tanah kohefif, tegangan tanah yang terjadi di permukaan tanah sampai kedalaman 1,5 kali diameter ($1,5d$) dianggap sama dengan nol dan konstan sebesar $9cu$ untuk kedalaman yang lebih besar dari $1,5d$ tersebut. Hal ini dianggap sebagai efek penyusutan tanah.

- a. Tiang ujung bebas

Beban lateral yang bekerja pada kedua jenis tiang tersebut akan menghasilkan pergerakan yang berbeda dari segi defleksi dan mekanisme keruntuhan tiang, terlihat pada **Gambar 2.5** (Hardiyatmo, 2011).

Pada tiang panjang tahanan terhadap gaya lateral akan ditentukan oleh momen maksimum yang dapat ditahan tiangnya sendiri (M_y).



Gambar 2.5 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi (a) Pondasi Tiang Pendek, (b) Pondasi Tiang Panjang

Pada **Gambar 2.5** diatas, f mendefinisikan letak momen maksimum, sehingga dapat diperoleh:

$$f = \frac{Hu}{9Cu d} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan mengambil momen terhadap titik dimana momen pada tiang maksimum, diperoleh:

$$M_{max} = Hu (e + 1,5d + 0,5f) \dots\dots\dots (2.14)$$

Momen maksimum dapat pula dinyatakan oleh persamaan berikut ini:

$$M_{max} = \frac{9}{4} dg^2 Cu \dots\dots\dots (2.15)$$

$$L = 1,5d + f + g \dots\dots\dots (2.16)$$

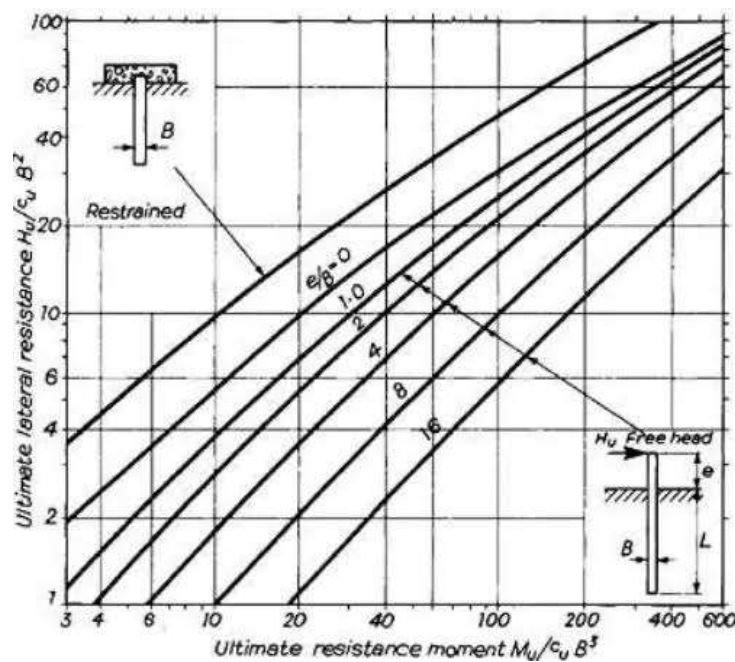
Berdasarkan persamaan diatas maka H_u

$$H_u = 9C_u d(L - g - 1,5d) \text{ (kN)} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan:

- L = panjang tiang (m)
- d = diameter tiang (m)
- H_u = beban lateral tiang (kN)
- C_u = kohesi tanah *undrained* (kN/m²)
- f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)
- g = jarak dari lokasi momen maks sampai dasar tiang (m)

Nilai beban lateral H_u dapat ditentukan secara langsung melalui grafik pada **Gambar 2.6**.

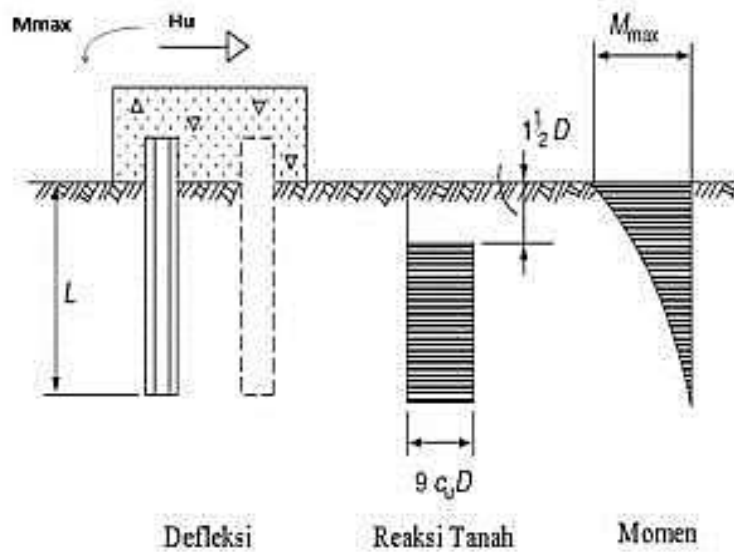


Gambar 2. 6 Nilai Lateral H_u Untuk Tiang Bebas Maupun Tiang Jepit Pada Tanah Kohesif

(Sumber: Broms, 1964)

b. Tiang ujung jepit

Pada tiang ujung jepit, Broms menganggap bahwa momen yang terjadi pada tubuh tiang yang tertanam di dalam tanah sama dengan momen yang terjadi di ujung atas tiang yang terjepit oleh *pile cap*. Mekanisme keruntuhan akibat beban lateral yang terjadi pada pondasi tiang dengan kondisi kepala tiang terjepit dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2. 7 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Kepala Tiang Jepit Akibat Beban Lateral Pada Tanah Kohesif
(Sumber: Broms, 1964)

Untuk tiang pendek, dapat dihitung tahanan *ultimate* tiang terhadap beban lateral dengan persamaan berikut:

$$M_{max} = H_u (0,5L + 0,75D) \dots\dots\dots (2.18)$$

Untuk tiang panjang H_u dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$H_u = \frac{2M_y}{(1,5d+0,5f)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dengan:

M_y = momen leleh (kN.m)

2. Pada tanah granular

Untuk tiang dalam tanah granular ($c=0$), seperti pasir, kerikil, batuan, Broms menganggap sebagai berikut :

- a. Tekanan tanah aktif yang bekerja di belakang tiang, diabaikan.
- b. Bentuk penampang tidak berpengaruh terhadap tekanan tanah ultimate atau tahanan ultimate.
- c. Tahanan tanah lateral sepenuhnya termobilisasi pada gerakan tiang yang diperhitungkan.

Distribusi tekanan tanah dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$P_u = 3P_0.K_p \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan:

P_u = tekanan tanah *ultimate*

P_0 = tekanan *overburden* efektif

K_p = $\tan^2 (45^\circ + \phi / 2)$

Φ = sudut geser dalam efektif ($^\circ$)

a. Tiang ujung bebas

Tiang pendek dianggap berotasi di dekat ujung bawah tiang. Tekanan yang terjadi dianggap dapat digantikan oleh gaya terpusat yang bekerja pada ujung bawah tiang.

Dengan mengambil momen terhadap ujung bawah, diperoleh:

$$Hu = \frac{0,5\gamma dL^3 K_p}{e+L} \dots\dots\dots (2.21)$$

Momen maksimum terjadi pada jarak f di bawah permukaan tanah, sehingga:

$$H_u = 1,5\gamma d K_p f^2 \dots\dots\dots (2.22)$$

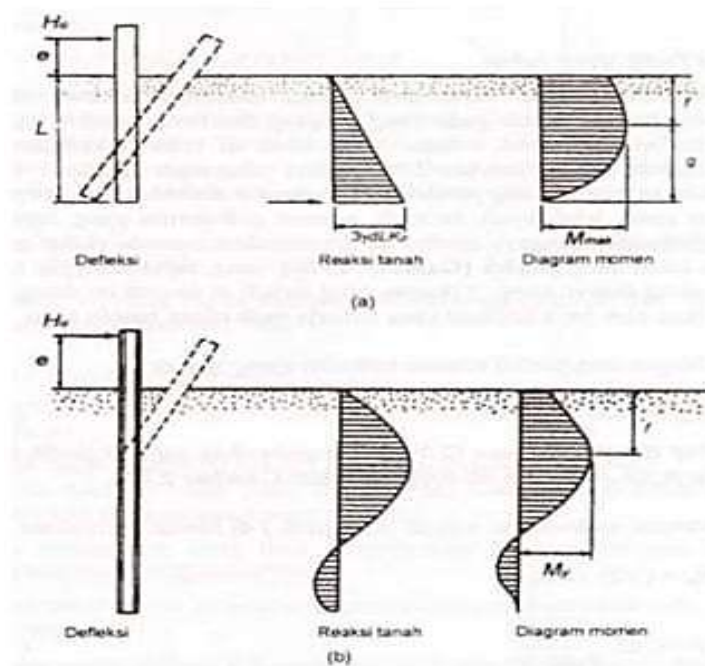
Lokasi momen maksimum:

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{Hu}{dK_p\gamma}} \dots\dots\dots (2.23)$$

Momen maksimum:

$$M_{max} = H_u (e + 1,5f) \dots\dots\dots (2.24)$$

Defleksi dan mekanisme keruntuhan pondasi tiang dengan kondisi kepala tiang bebas akibat beban lateral pada tanah granular dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Kepala Tiang Bebas Akibat Beban Lateral Pada Tanah Granular

(Sumber: Broms, 1964)

b. Tiang ujung jepit

Model keruntuhan untuk tiang-tiang pendek (kaku) keruntuhan tiang berupa translasi, beban lateral ultimit dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$H_u = 1,5dyL^2K_p \dots\dots\dots (2.25)$$

Lokasi momen maksimum dapat dicari dengan persamaan (2.26)

Momen maksimum

$$M_{max} = \frac{2}{3} H_u L \dots\dots\dots (2.26)$$

Momen leleh:

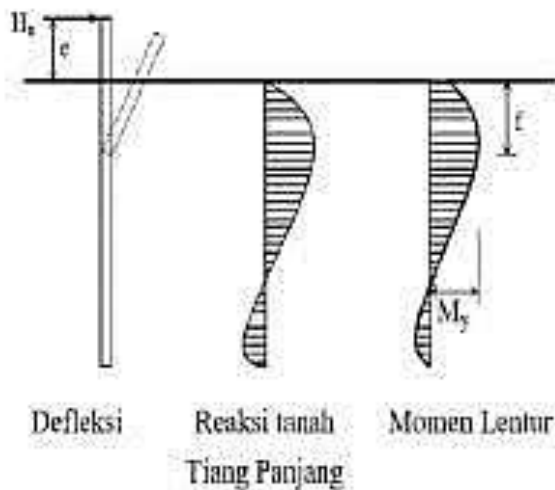
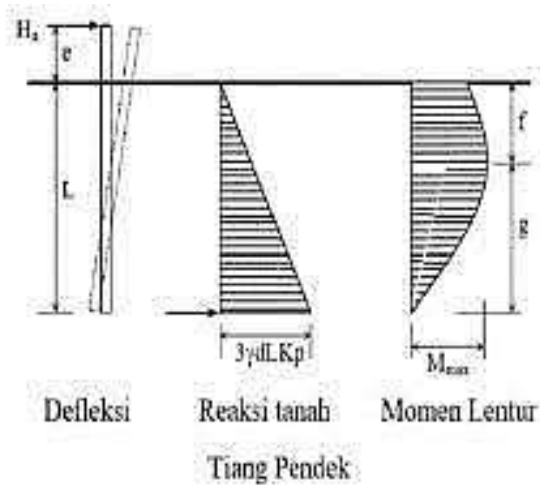
$$M_y = (0,5\gamma L^2 K_p) - H_u L \dots\dots\dots (2.27)$$

Dengan:

H_u = beban lateral (kN)

K_p = koefisien tekanan tanah pasif

- M_{max} = momen maksimum (kN.m)
- M_y = momen leleh (kN.m)
- L = panjang tiang (m)
- d = diameter tiang (m)
- f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)
- γ = berat isi tanah (Kn/m^3)
- e = jarak beban dari permukaan tanah (m)



Gambar 2. 9 Defleksi dan Mekanisme Keruntuhan Pondasi Tiang Dengan Kondisi Tiang Jepit Akibat Beban Lateral Pada Tanah Granular (a) Pondasi Tiang Pendek, (b) Pondasi Tiang Panjang

(Sumber: Broms, 1964)

Untuk tiang ujung jepit yang tidak kaku (tiang panjang), dimana momen maksimum mencapai M_y di dua lokasi ($M_u^+ = M_u^-$) maka H_u dapat diperoleh dari persamaan berikut:

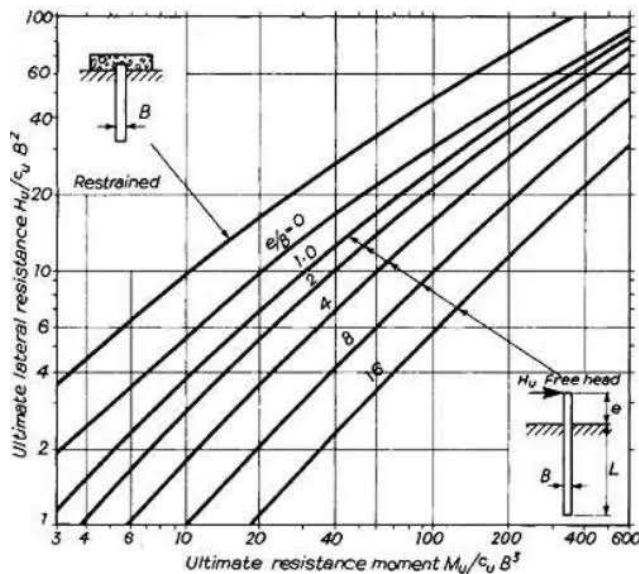
$$H_u = \frac{2My}{e + \frac{2f}{3}} \dots\dots\dots (2.28)$$

$$H_u = \frac{2My}{e + 0,54 \sqrt{\frac{H_u}{\gamma \cdot d \cdot K_p}}} \dots\dots\dots (2.29)$$

Dengan:

- H_u = beban lateral (kN)
- K_p = koefisien tekanan tanah pasif = $\tan^2(45^\circ + \phi/2)$
- M_y = momen leleh (kN.m)
- d = diameter tiang (m)
- f = jarak momen maksimum dari permukaan tanah (m)
- γ = berat isi tanah (Kn/m^3)
- e = jarak beban dari permukaan tanah (m) = 0

Nilai H_u juga dapat dicari dengan menggunakan grafik pada **Gambar 2.10**



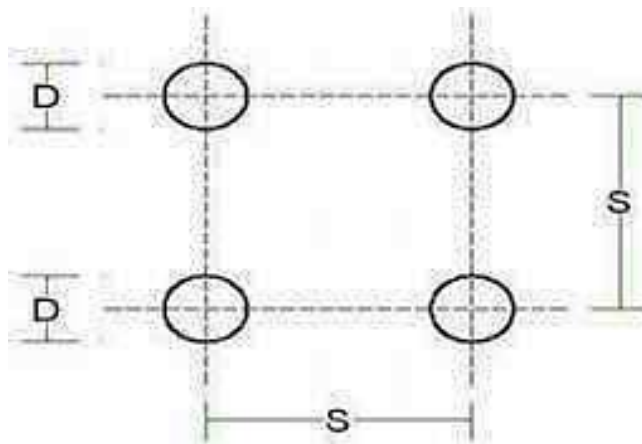
Gambar 2. 10 Grafik H_u Untuk Tiang Jepit Maupun Tiang Bebas Pada Tanah Non-Kohesif

(Sumber: Broms, 1964)

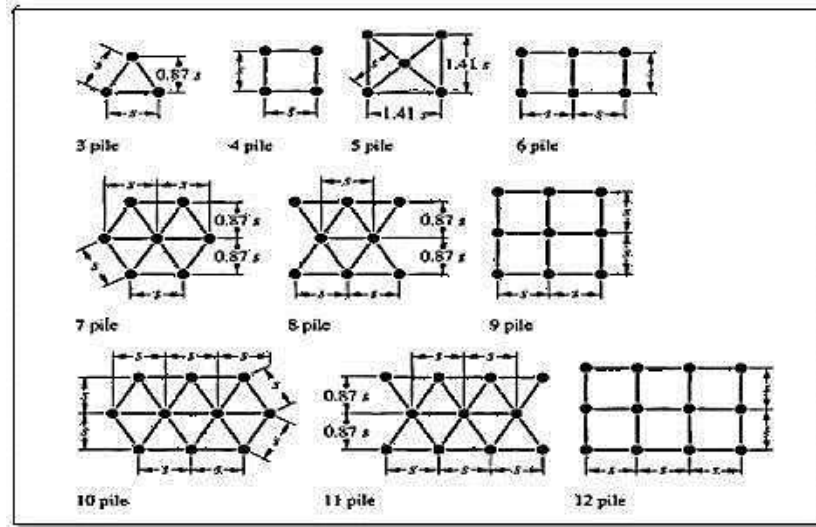
2.1.7 Kapasitas Dan Efisiensi Pondasi *Bored Pile*

Jarak antara *Bored Pile* di dalam kelompok tiang akan mempengaruhi kapasitas daya dukung kelompok tiang. Bila beberapa tiang dikelompokkan dengan jarak yang saling berdekatan maka tegangan tanah akibat gesekan tiang dengan tanah mempengaruhi daya dukung tiang yang lain. Jarak minimum antara dua tiang adalah: $S > 2D$. Berdasarkan laporan dari *ASCE Committee on deep Foundation* (1984), menganjurkan untuk tidak menggunakan efisiensi kelompok untuk mendeskripsikan aksi kelompok tiang (*group action*). Laporan yang dihimpun berdasarkan studi dan publikasi sejak 1963 itu menganjurkan bahwa tiang gesekan pada tanah pasir dengan jarak tiang sekitar $2D - 3D$ akan memiliki daya dukung yang lebih besar daripada jumlah total daya dukung individual tiang. Apabila $S > 3D$ maka tidak ekonomis, karena akan memperbesar ukuran/dimensi *pier* (*footing*). (Paso, n.d.)

Susunan tiang sangat berpengaruh terhadap luas denah *pile cap*, yang secara tidak langsung tergantung dari jarak tiang. Bila jarak tiang kurang teratur atau terlalu lebar, maka luas denah *pile cap* akan bertambah besar dan berakibat volume beton menjadi bertambah besar sehingga biaya konstruksi membengkak. Gambar jarak antar tiang kelompok terlihat pada **Gambar 2.11**. Susunan jarak antar tiang dapat dilihat pada **Gambar 2.12** (Bowles, 1999). (DAS, BRAJA & RAMANA G.V. - 1993 - *Principles of Soil Dynamics, First Edition.Pdf*, n.d.)



Gambar 2. 11 Jarak Antar Tiang Dalam Kelompok

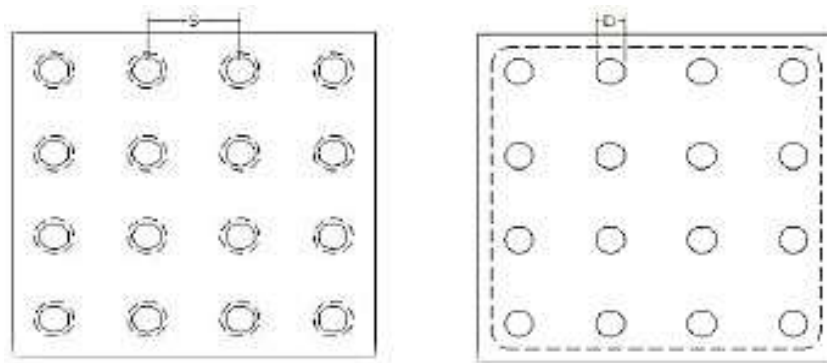


Gambar 2. 12 Susunan Jarak Antar Tiang Dalam Kelompok

(Sumber: Bowles, 1999)

Pada kelompok tiang yang dasarnya bertumpu pada lapisan lempung lunak, faktor aman terhadap keruntuhan blok harus diperhitungkan, terutama untuk jarak tiang – tiang yang dekat. Pada tiang yang dipasang pada jarak yang besar, tanah diantara tiang tidak bergerak sama sekali ketika tiang bergerak ke bawah oleh akibat beban, tanah diantara tiang juga ikut bergerak turun. Pada kondisi ini, kelompok tiang dapat dianggap sebagai satu tiang besar dengan dengan lebar yang sama dengan lebar kelompok tiang. Saat tanah yang mendukung beban kelompok tiang ini mengalami keruntuhan, maka model keruntuhan disebut keruntuhan blok.

Jadi, pada keruntuhan blok, tanah yang terletak diantara tiang bergerak kebawah bersama-sama dengan tiangnya. Mekanisme keruntuhan yang demikian dapat terjadi pada tipe-tipe tiang pancang maupun pada *Bored Pile*. **Gambar 2.13** berikut menunjukkan mekanisme keruntuhan pada *Bored Pile*.



Gambar 2. 13 Mekanisme Keruntuhan Pondasi Bored Pile (Kiri Tiang Tunggal, Kanan Kelompok Tiang)

Umumnya model keruntuhan blok terjadi bila rasio jarak tiang dibagi diameter (S/d) sekitar kurang dari 2 (dua). Whiteker (1957) memperlihatkan bahwa keruntuhan blok terjadi pada jarak $1,5 D$ untuk kelompok tiang yang berjumlah 3×3 , dan lebih kecil dari $2,25 D$ untuk tiang yang berjumlah 9×9 . Kapasitas *ultimate* kelompok tiang dengan memperlihatkan faktor efisiensi tiang dinyatakan dengan rumus sebagai berikut.

$$Q_g = E_g n Q_u \dots\dots\dots (2.30)$$

Dengan:

Q_g = beban maksimum kelompok tiang yang mengakibatkan keruntuhan

E_g = efisiensi kelompok tiang (%)

n = jumlah tiang dalam kelompok

Q_u = daya dukung ultimit tiang tunggal (ton)

Beberapa persamaan efisiensi tiang telah diusulkan untuk menghitung kapasitas kelompok tiang, namun semuanya hanya bersifat pendekatan. Persamaan – persamaan yang diusulkan didasarkan pada susunan tiang, dengan mengabaikan panjang tiang, variasi bentuk tiang yang meruncing, variasi sifat tanah dengan kedalaman dan pengaruh muka air tanah. Persamaan untuk menghitung efisiensi kelompok tiang

adalah sebagai berikut.

1. Metode *Converse – Labarre*

Efisiensi kelompok tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n-1)m+(m-1)n}{90mn} \dots\dots\dots (2.31)$$

Dengan:

- m = jumlah baris tiang
- n = jumlah tiang dalam satu baris
- θ = Arc tg D/S (°)

2. Metode *Los Angeles Group*

Persamaan efisiensi kelompok tiang berdasarkan metode *Los Angeles Group* adalah sebagai berikut:

$$Eg = 1 - \frac{d}{\pi.s.m.n} \left[m(n-1) + n(m-1) + \sqrt{2(n-1)(m-1)} \right] (2.32)$$

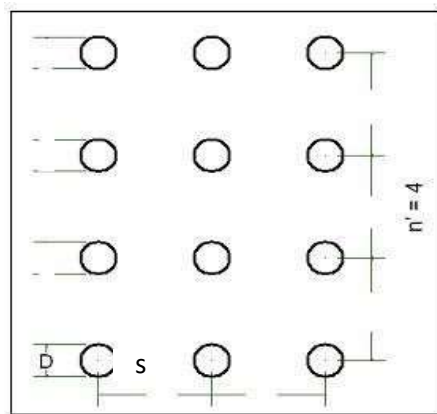
Dengan:

- d = diameter pondasi (cm)
- s = jarak pusat ke pusat tiang (cm)

3. *Seiler – Keeney Formula*

Efisiensi kelompok tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$Eg = \left\{ 1 - \left[\frac{11s}{7(s^2-1)} \right] \left[\frac{m+n-2}{m+n-1} \right] \right\} + \frac{0,3}{m+n} \dots\dots\dots (2.33)$$



Gambar 2. 14 Jarak Tiang (s)

2.1.8 Penurunan Pondasi *Bored Pile*

Pada waktu tiang dibebani, tiang akan mengalami konsolidasi dan tanah disekitarnya akan mengalami penurunan. Penurunan terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun oleh pengurangan rongga pori atau air di dalam tanah tersebut.

Penurunan segera atau penurunan elastis adalah penurunan pondasi yang terletak pada tanah berbutir halus yang jenuh dan dapat dibagi menjadi tiga komponen.

Penurunan total adalah jumlah dari ketiga komponen tersebut, yang ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$S = Se_{(1)} + Se_{(2)} + Se_{(3)} \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

Dengan:

S = penurunan total (m)

$Se_{(1)}$ = penurunan elastis dari tiang (m)

$Se_{(2)}$ = penurunan tiang oleh beban di ujung tiang (m)

$Se_{(3)}$ = penurunan tiang oleh beban di sepanjang batang tiang (m)

$$Se_{(1)} = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{A_p E_p} \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

$$Se_{(2)} = \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{d \cdot q_p} \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

$$Se_{(3)} = \frac{Q_{wp} \cdot C_p}{L \cdot q_p} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

Dengan:

Q_{wp} = daya dukung yang bekerja pada ujung tiang dikurangi daya dukung *friction* (kN)

Q_{ws} = daya dukung *friction* (kN)

A_p = Luas penampang tiang (m²)

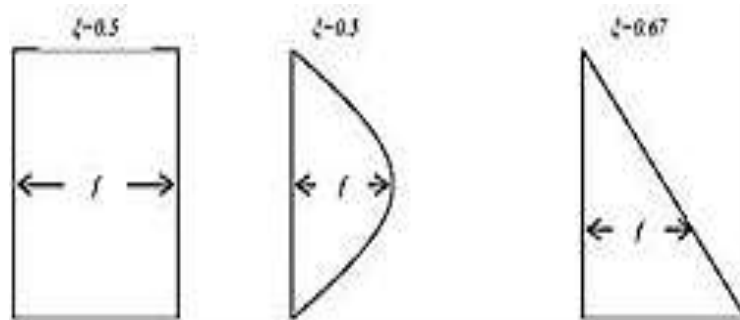
L = panjang tiang (m)

- E_p = modulus elastis dari bahan tiang (kN/m²)
- ξ = koefisien dari *skin friction*
- d = diameter tiang (m)
- q_p = daya dukung *ultimate* (kN)
- C_0 = koefisien empiris
- C_s = konstanta empiris

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}} \right) C_p \dots\dots\dots (2.38)$$

Nilai ξ tergantung dari unit tahanan friksi alami (*the natural of unit friction resistance*) di sepanjang tiang tertanam dari dalam tanah. Nilai $\xi = 0,5$ untuk bentuk unit tahanan friksi alami yang berbentuk seragam atau simetris, seperti persegi panjang atau parabolik seragam, umumnya pada tanah lempung atau lanau.

Sedangkan untuk tanah pasir nilai $\xi = 0,67$ untuk bentuk unit tahanan friksialaminya berbentuk segitiga. Pada **Gambar 2.15** dibawah akan ditunjukkan bentuk unit tahanan friksi.



Gambar 2. 15 Bentuk Unit Tahanan Friksi

(Sumber: Bowles, 1993)

2.2 Pile Integrity Test (PIT)

Pile Integrity Test (PIT) atau juga sering disebut *low strain dynamic test* atau *sonic pulse echo method* adalah salah satu metode untuk memprediksi kondisi tiang. Dinamakan “*low strain dynamic test*” karena pada metode ini palu tangan yang dipukulkan pada *pile head* menghasilkan regangan rendah (*low strain*). Metode ini cukup efektif dari segi biaya dan waktu.

PIT dikembangkan berdasarkan teori perambatan (*wave propagation theory*) pada media. Prinsip dasarnya adalah pukulan dari palu tangan akan menghasilkan gelombang tegangan (*stress waves*) yang merambat turun sepanjang tiang dengan kecepatan tetap. Perubahan terhadap penampang (misalnya diameter mengecil atau mencapai dasar tiang) dan kualitas material (misalnya adanya rongga pada beton) akan menghasilkan pantulan gelombang. PIT mengevaluasi data gaya dan kecepatan untuk ditarik kesimpulan mengenai kondisi tiang tersebut.

Prinsip pengujian PIT menggunakan teori gelombang 1-D CASE. Pengujian PIT saat ini hanya dapat dilakukan pada tiang beton saja, karena adanya limitasi ratio diameter terhadap panjang tiang dan dilaksanakan merujuk pada ASTM D5882-07 (Lrfd, 2004)



Gambar 2. 16 *Pile Integrity Test*

2.2.1 Perangkat Pengujian

Metode *Pile Integrity Test* membutuhkan instrument akselerometer, sebuah *hammer* dan *processing unit* atau *PIT Collector*. Skema pemasangan instrument tersebut tergantung metode analisis yang dipilih.

Terdapat beberapa peralatan yang digunakan pada pengujian *Pile Integrity Test* yaitu:

a. Akselerometer

Akselerometer adalah alat untuk mengukur total gaya spesifik eksternal pada suatu struktur. Gaya ini seringkali hanya dikaitkan dengan percepatan atau akselerasi, namun hal ini tidak sepenuhnya benar. Karena akselerometer yang diletakan di atas meja dan memiliki percepatan nol, akan terbaca gaya spesifik sebesar sama dengan akselerasi akibat gaya gravitasi bumi di lokasi tersebut yaitu sebesar 1 g (gravitasi bumi berbeda satu lokasi dengan lokasi lainnya). Hal ini dikarenakan meja menghasilkan reaksi pada akselerometer sebesar berat akselerometer. Jika akselerometer berada di ruang vakum sehingga tidak ada gaya eksternal yang bekerja maka akselerometer akan terbaca nol.

Akselerometer mengukur total gaya spesifik eksternal pada suatu struktur, gaya ini bisa berupa statik seperti gaya konstan dari gravitasi, atau bisa juga dinamik seperti gerakan atau getaran dari akselerometer. Gaya yang disebabkan oleh getaran atau perubahan gerakan (akselerasi) menyebabkan massa “menekan” material piezoelectric (berisi struktur Kristal mikroskopik) yang menghasilkan muatan listrik yang proporsional dengan gaya yang dikenakan. Oleh karena muatan yang dihasilkan proporsional terhadap gaya, dan massa adalah konstan, maka muatan tersebut juga proporsional terhadap akselerasi.

Ada dua tipe piezoelectric accelerometer. Tipe pertama adalah high impedance output accelerometer. Pada tipe ini Kristal piezoelektrik menghasilkan muatan listrik yang dihubungkan langsung dengan instrument pengukur. Output dari muatan memerlukan akomodasi khusus dan instrument yang banyak dimiliki oleh fasilitas penelitian. Sedangkan tipe kedua adalah *low impedance output accelerometer*. *Low*

impedance output accelerometer memiliki muatan akselerometer sama seperti tipe pertama namun terpasang *micro-circuit* tipis dan transistor FET yang mengkonversi muatan tersebut menjadi *low impedance voltage* yang dapat dengan mudah dihubungkan dengan instrument standar.

Akselerometer umumnya dipasang pada kepala tiang dengan *adhesive* berupa perekat khusus (*wax*) dan lapisannya dibuat setipis mungkin untuk menghindari redaman getaran akibat fleksibilitas dari lapisan perekat.



Gambar 2. 17 Akselerometer

b. *Hammer*

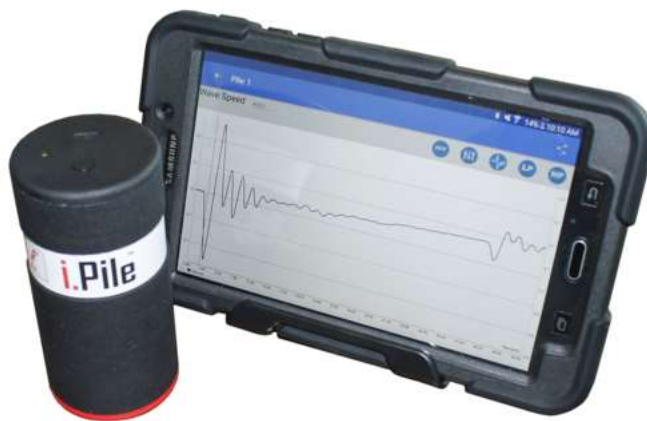
Seperti telah disebutkan di atas bahwa PIT menggunakan palu tangan untuk menghasilkan *low strain*. Ada dua jenis palu yang disediakan sesuai dengan jenis metode analisisnya, yaitu *non-instrumented hammer* dan *instrumented hammer*. Yang pertama adalah untuk metode Pulse Echo Method (PEM) dimana palu tidak dihubungkan dengan processing unit dan yang kedua untuk metode *Transient Response Method* (TRM) palu dihubungkan ke *processing unit* dengan kabel untuk membaca data gaya.



Gambar 2. 18 Hammer

c. *PIT Collector*

PIT Collector dikembangkan oleh Pile Dynamics, Inc. Alat ini memproses sinyal yang masuk baik dari akselerometer maupun dari *instrumented hammer*. Hasil data rekaman sinyal dapat langsung dilihat pada layar. Data proyek disimpan dengan menggunakan PCMCIA *flash card* sehingga memungkinkan melihat dan memproses hasil data rekaman melalui PC atau laptop.

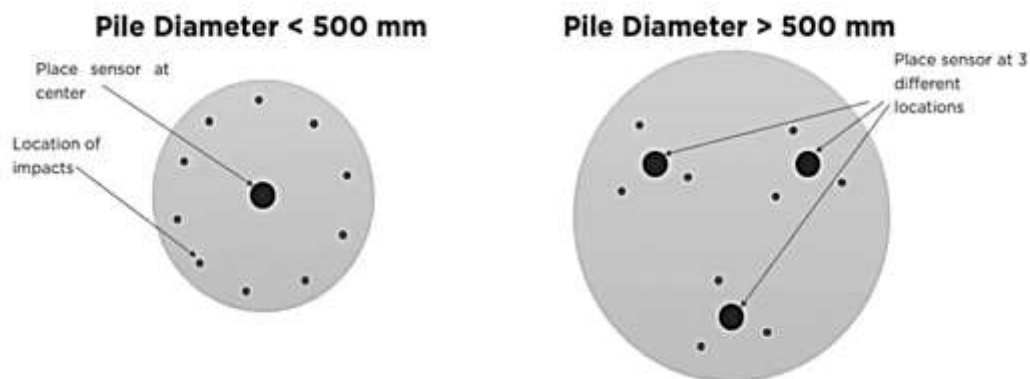


Gambar 2. 19 PIT Collector

ASTM (2007) memberikan langkah pengujian integritas tiang dengan PIT sesuai standar ASTM D-5882, yaitu:

1) Persiapan

Untuk beton cor di tempat, pengujian dapat dilakukan minimal pada beton berusia 7 hari atau setelah mencapai kekuatan 75% dari kekuatan desain. Pastikan permukaan kepala tiang dapat diakses dan bersih dari tanah dan material lain. Jika diperlukan, gerinda permukaan tiang sehingga dihasilkan permukaan yang halus. Tempelkan sensor accelerometer pada daerah yang telah ditentukan jauh dari sisi kepala tiang. Untuk tiang dengan diameter <500 mm sensor ditempatkan di tengah tiang, sedangkan diameter >500 mm, minimum terdapat 3 lokasi penempelan sensor. Siapkan alat pemukul (palu pemukul/ *hammer*) sehingga pukulan tegak lurus dengan tiang dan jarak dengan sensor/ *accelerometer* tidak lebih dari 300 mm.



Gambar 2. 20 Pile Placement Pile Integrity Test

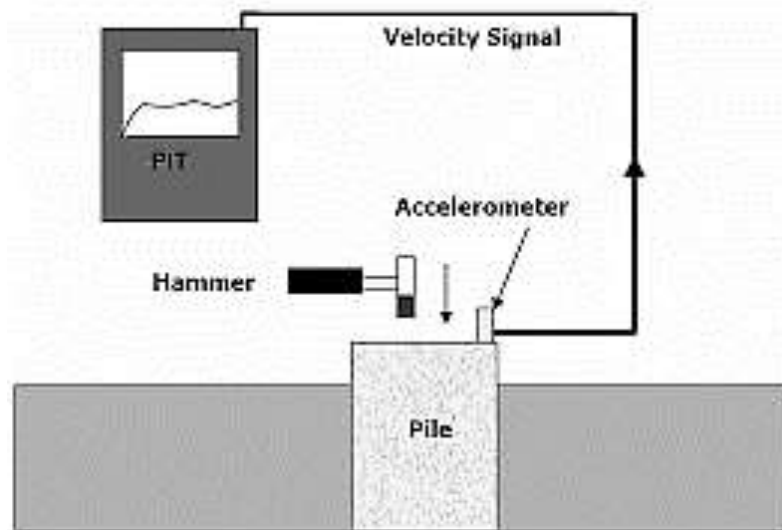
2) Pencatatan

Data yang perlu dicatat saat pengujian diantaranya:

- diameter dan panjang tiang,
- tanggal pengecoran,
- as-built geometri (volume beton, casing permanent atau sementara, besi tulangan),
- data tanah,
- lokasi transducer,
- tanggal pengujian.

3) Pengujian

Lakukan beberapa kali pukulan dan rekam setiap atau rata-rata pukulan. Selama pemukulan, monitor kecepatan dan gaya dari beberapa pukulan untuk didapatkan data yang konsisten. Data yang konsisten dipengaruhi oleh pukulan yang seragam, sistem transducer berfungsi dengan baik, sensor accelerometer terpasang dengan baik, dan perangkat komputer PIT berfungsi dengan baik.



Gambar 2. 21 Skema Pemasangan Alat PIT

2.2.2 Perambatan Gelombang Pada Pondasi Tiang

Pada tiang yang elastis linier, gelombang tegangan (*stress waves*) merambat sepanjang tiang dengan kecepatan gelombang sebesar c . Kecepatan gelombang tersebut dipengaruhi oleh sifat material yaitu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dimana:

c = kecepatan gelombang longitudinal (m/s)

E = modulus elastisitas (N/m^2)

ρ = kerapatan material atau density (kg/m^3)

Dijelaskan bahwa ketika sebuah tumbukan (*impact*) dari palu dikenakan pada kepala tiang (*pile head*) maka akan timbul tegangan berupa gelombang (*stress waves*) yang berjalan sepanjang tiang sebesar p . menurut studi perambatan gelombang (*wave propagation*) tegangan gelombang dibagi kecepatan partikel v dan luas penampang A disebut impedansi, dirumuskan sebagai berikut:

$$Z = \frac{p}{v \cdot A} = \frac{F}{v}$$

Dimana:

Z = impedansi (kg/s)

p = tegangan gelombang (N/m² atau Pa)

v = kecepatan partikel (m/s)

A = luas penampang (m²)

Dasar analisis uji PIT adalah simpangan terjauh dari titik keseimbangan perambatan gelombang tekan di sepanjang tiang, dimana:

- a. Apabila sifat tanah, keseragaman material, dan ukuran penampang tiang tetap serta gelombang datang hanya dipantulkan saat mencapai dasar tiang, maka amplitude gelombang tekan akan menurun terhadap kedalaman.
- b. Apabila tidak ada keseragaman material tiang, perubahan penampang, dan perubahan sifat kekerasan tanah, maka amplitude gelombang tekan akan menurun secara tiba-tiba.

2.2.3 Hasil Uji PIT

Secara umum, bentuk sinyal yang diperoleh dari hasil pengujian PIT diklasifikasikan sebagai berikut:

- 1) Tidak ada pantulan

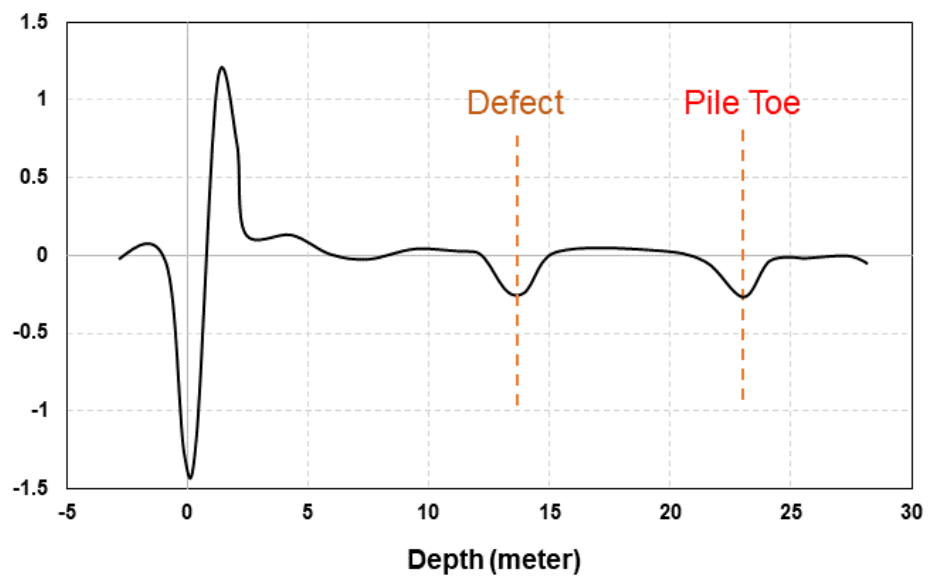
Terjadi dikarenakan redaman tanah terlalu besar atau tiang yang terlalu panjang

- 2) Hanya ada satu pantulan gelombang

Terjadi karena dijumpai perubahan impedansi yang besar. Dapat terjadi karena pantulan dan ujung tiang, perubahan penampang tiang atau perubahan lapisan tanah

- 3) Ada beberapa pantulan yang berulang dalam interval yang sama
Mengindikasikan adanya keretakan horizontal pada tiang
- 4) Pantulan yang tidak teratur

Dalam hal ini diperlukan analisa lebih teliti. Biasanya dapat dilakukan oemodelan computer untuk memperhitungkan factor redaman tanah, untuk kemudian dilakukan proses pencocokan sinyal (*signal matching*) antara hasil yang diperoleh dari pemodelan komputer dengan sinyal dari hasil uji. Output dari pemodelan demikian adalah diperolehnya perkiraan diameter tiang terhadap kedalaman.



Gambar 2. 22 Grafik Hasil Uji PIT

Dari grafik dapat dilihat bahwa:

- a. Sumbu vertical menandakan sinyal amplitude
- b. Sumbu horizontal menandakan kedalaman

Hasil uji PIT dianalisis berdasarkan perubahan impedansi (BTA), yaitu perbandingan antara area bagian tiang yang terekam terhadap desain area tiang yang ditunjukkan dalam presentase (*American Standard Testing and Material*, 1979) seperti disajikan pada **Tabel 2.7**

Tabel 2.7 Klasifikasi Hasil Uji PIT Terhadap Perubahan Impedansi

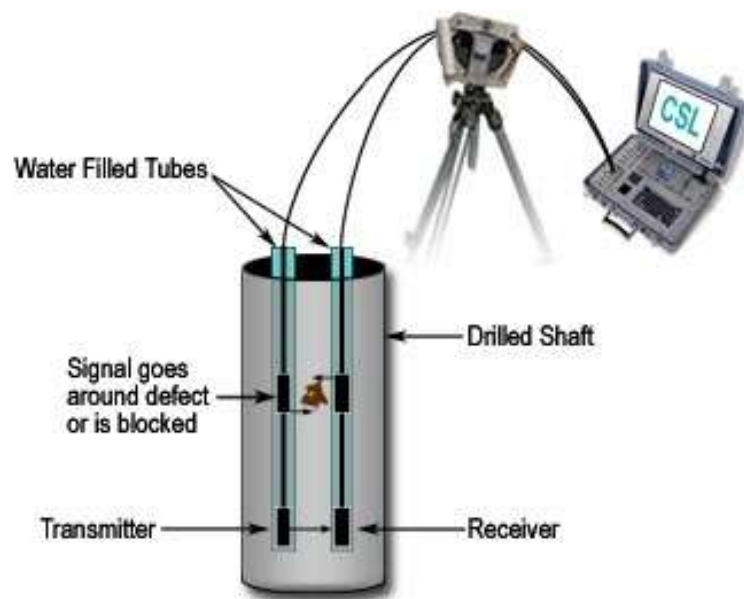
BTA (%)	Category
100	<i>Undamaged – Pile in good condition</i>
80 – 99	<i>Slightly Damaged – Pile has a minor problem but is still tolerable</i>
60 – 79	<i>Damaged – Pile has significant problems; further analysis and repair needs</i>
<i>Below 60</i>	<i>Broken – Pile to be rejected</i>

2.3 Crosshole Sonic Logging (CSL)

Sonic logging test bersifat tidak merusak (non destruktif) yang digunakan untuk mengetahui berbagai kerusakan pada beton mulai dari keropos, retak akibat penyusutan beton, segregasi material beton karena getaran yang terlalu kuat atau karena metoda pengecoran yang tidak baik, tercucinya material semen akibat aliran air tanah, tercampurnya beton dengan tanah/lumpur (bentonite) pengeboran, pengecilan penampang beton (necking) akibat kelongsoran dinding bor dan sebagainya.

Prinsip kerja dari metode ini yaitu dengan menggunakan alat yang disebut *sonic integrity tester* yang berupa computer yang dapat menghasilkan, menerima, men-digitasi gelombang ultrasonic. Alat ini juga dilengkapi dengan pengukur kedalaman. Sepasang probe pemancar (transmitter) dan penerima (receiver) gelombang ultrasonic. Selanjutnya disebut probe uji yang memiliki alat pengukur kedalaman hingga 100 m.

Crosshole Sonic Logging (CSL) merupakan metode pengujian yang dilakukan untuk menguji jaminan kualitas atau integritas pondasi bore pile. Pengujian ini dapat mengindikasikan adanya anomali material atau kerusakan struktur pondasi yang biasanya diakibatkan beton keropos, segregasi material beton, metode pengecoran yang tidak baik, serta necking akibat kelongsoran dinding bor. Pengujian Crosshole Sonic Logging (CSL) menggunakan gelombang ultrasonik yang kemudian di komputasi oleh komputer sonic logging system.



Gambar 2. 23 Skematik Pengujian CSL

2.3.1 Perangkat Pengujian

Peralatan yang diperlukan dalam pengujian *Sonic Logging* (CSL) berdasarkan ASTM D6760-08 adalah sebagai berikut:

- a. Tabung akses
- b. Sonic Logging System
Berupa komputer yang dapat menghasilkan, menerima, dan mendigitasi gelombang ultra sonic. Alat ini juga dilengkapi dengan pengukur kedalaman
- c. Probe pemancar (*transmitter*)
- d. Probe penerima (*receiver*)

- e. Probe memusat (*centralizer*)
- f. kompas



Gambar 2. 24 Alat Pengujian CSL

ASTM (2008) memberikan langkah pengujian integritas tiang dengan CSL menurut standar ASTM D6760-08, yaitu:

1. Instalasi Pipa Akses

Pipa akses dipasang pada saat tahap konstruksi. Jumlah pipa akses harus mencakup potongan melintang dari pondasi bored pile. Untuk menentukan jumlah pipa akses yang dibutuhkan, dapat dilakukan dengan memasang 1 pipa akses setiap diameter pondasi 0.25 – 0.30 m. Jumlah minimum pipa akses yang digunakan sebanyak 3 pipa dan dipasang secara merata sepanjang keliling pondasi. Pipa akses plastik atau material PVC tidak disarankan digunakan untuk pengujian ini, tetapi dapat digunakan pada kondisi tertentu jika telah disetujui dengan syarat pemasangannya lebih rapat dan tidak berubah bentuk akibat temperatur tinggi dari proses curing.

Pipa akses harus tegak lurus, bebas dari material lain, dan sisi luarnya bebas dari kontaminasi oli, minyak, dan kotoran lainnya. Ujung bawah pipa harus tertutup rapat dan ujung atasnya ditutup dengan tutup yang dapat dilepas untuk mencegah beton dan material lainnya masuk

kedalam pipa. Jika penyambungan pipa akses diperlukan, hindari penyambungan dengan pengelasan dan penyambungan menggunakan selotip atau senyawa lain. Pemasangan pipa akses sebisa mungkin dipasang sehingga dasar dari pipa akses berdekatan dengan dasar pondasi, sehingga pondasi dapat teruji secara menyeluruh. Pipa akses diikat didalam tulangan pondasi dengan jarak tertentu untuk menjaga alignment pipa saat pengangkatan/mobilisasi tulangan. Pipa akses diisi air sebelum atau selambat-lambatnya 1 jam setelah pengecoran untuk memastikan beton merekat dengan baik.

2. Pengujian

Pelaksanaan dilakukan 2 minggu atau setelah pelaksanaan pengecoran beton telah mencapai 80% dari kekuatan rencana. Untuk pelaksanaan pengujian, telah tersedia informasi tentang panjang pipa, kedalaman pondasi, waktu pelaksanaan konstruksi dan bagian-bagian lainnya yang dianggap perlu untuk pengujian. Paling sedikit 24 jam sebelum pengujian, dilakukan verifikasi kondisi terakhir pipa termasuk panjang pipa. Pengujian dilakukan untuk semua kombinasi sesuai dengan konfigurasi pemasangan pipa. Jumlah kombinasi atau trase pengujian dapat dihitung sesuai **Tabel 2.8**.

Tabel 2.8 Jumlah Kombinasi Pengujian CSL

Jumlah Pipa Akses	Jumlah Kombinasi
2	1
3	3
4	6
5	10
N	$n(n-1)/2$

Untuk memulai pengujian, masukan *probe transmitter* dan *probe receiver* kedalam pipa akses. Turunkan kedua *probe* secara bersamaan dan hati-hati hingga ujung pipa akses. Mulai perekaman getaran gelombang ultrasonik bersamaan dengan penarikan kedua probe hingga ujung atas pipa akses. Ulangi langkah tersebut untuk kombinasi pipa akses lainnya.

Pada pengujian CSL, sumber gelombang dihasilkan dari gelombang bertegangan tinggi, sedangkan penerima gelombang dan pengukuran kedalaman direkam secara bersamaan. Sensor penerima juga dilengkapi dengan peredam yang disesuaikan secara elektronik untuk getaran atau gangguan lainnya. Data yang didapatkan kemudian direkam dan diproses dengan komputer sonic logging system (ASTM, 2008). Data yang diperoleh berupa grafik kecepatan gelombang (*wave speed*) terhadap kedalaman (*depth*), grafik waktu tempuh (*arrival time*) terhadap kedalaman (*depth*), energi kedalaman dan *waterfall diagrams* terhadap kedalaman.



Gambar 2. 25 Pengujian CSL

Menurut Sellountou, dkk (2019), tidak ada kriteria/standar umum untuk mengevaluasi hasil pengujian CSL. Penundaan FAT (FAT Increase) direkomendasikan daripada pengurangan kecepatan karena pipa akses

sering tidak paralel, dan oleh karena itu kecepatan yang dihitung dari jarak atas mungkin tidak akurat. Walaupun demikian, pengurangan energi (*energy reduction*) yang cukup besar akan menentukan *defect* bahkan jika nilai FAT normal (Likins, dkk, 2007).

2.3.2 Perambatan Gelombang Uji *Sonic Logging*

Sonic log mengukur waktu tempuh (transit time) gelombang suara yang merambat melalui formasi yang dipancarkan oleh transmitter dan diterima oleh receiver pada jarak tertentu. Transit time (Jt) dipengaruhi oleh jenis batuan dan porositas. (Interim, n.d.)

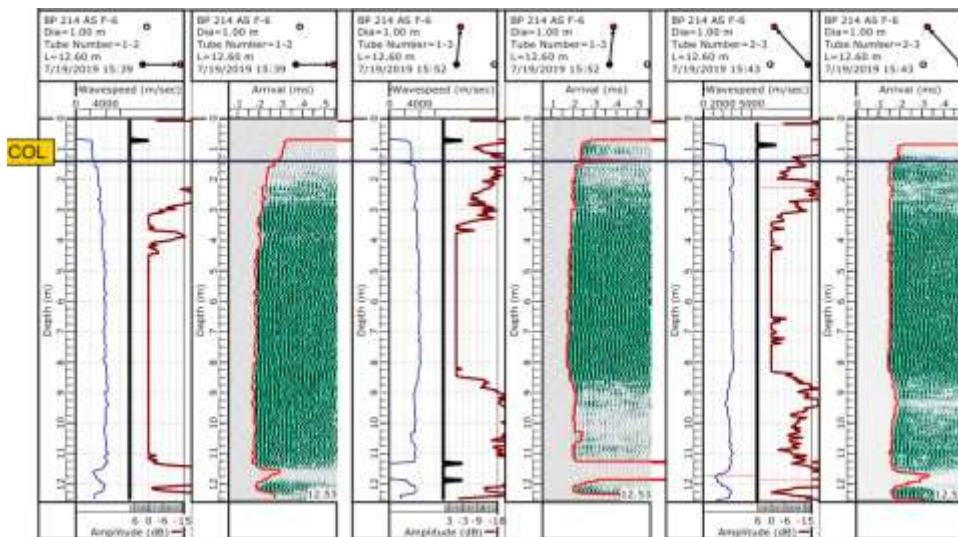
Gelombang ultra sonic yang dipancarkan oleh probe pemancar dan diterima oleh probe penerima diteruskan ke computer sonic integrity tester. Selanjutnya, sinyal ultra sonic yang diterima di-digitasi oleh computer lalu diplotkan dalam bentuk grafik. Sumbu X menunjukkan waktu rambat dan sumbu Y menunjukkan kedalaman tiang. Kerapatan grafik yang diperoleh mengidentifikasi homogenitas beton dalam arah yang diuji. Dalam beton yang homogen dan tidak ada kerusakan, kecepatan gelombang ultra sonic akan selalu konstan. Kecepatan gelombang ultra sonic yang meningkat secara tiba-tiba (waktu rambat lebih pendek) menandakan adanya area beton yang lebih rendah mutunya. Kehilangan jejak rambat gelombang ultra sonic menandakan adanya kerusakan/retak/ void pada beton alam arah rambat gelombang ultra sonic diantara dua pipa uji. **Gambar 2.16** memperlihatkan contoh hasil pengujian beton yang baik dan beton yang mengalami kerusakan. Jadi pada dasarnya interpretasi hasil uji dilakukan dengan membandingkan kerapatan relatif grafik yang diperoleh.

Kecepatan rambat gelombang pada pengujian *Crosshole Sonic Logging* (CSL) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{kecepatan rambat gelombang} = \frac{\text{jarak}}{\text{waktu tiba pertama gelombang}}$$

2.3.3 Hasil Uji CSL

Dari pembacaan grafik hasil uji, dilakukan analisis untuk mengevaluasi integritas tiang beton dengan mengukur waktu rambat gelombang antara sumber dan penerima / First Arrival Time (FAT), menghitung cepat rambat yang sesuai (wavespeed), dan mengukur energi respon / pengurangan energi penerima (energy reduction). Semakin lama waktu tempuh dan semakin lambat kecepatan rambat gelombang menunjukkan adanya anomali material beton antar pipa uji. Sedangkan, sinyal yang hilang atau tidak terbaca, menunjukkan adanya kecacatan (defect) di antara satu atau lebih kombinasi pipa.



Gambar 2. 26 Grafik Hasil Uji CSL

Berdasarkan Likins dkk. (2007), pengelompokan tingkat kondisi integritas tiang beton dapat ditentukan sesuai **Tabel 2.9**.

Tabel 2.9 Klasifikasi Tingkat Kondisi Berdasarkan Uji CSL

<i>FAT Increase</i>		<i>Energy Reduction</i>	<i>Classification</i>
0 to 10%	<i>and</i>	< 6 dB	(G) Good – Satisfactory
11 to 20%	<i>and</i>	< 9 Db	(Q) Questionable – Anomaly
21 to 30%	<i>and</i>	9 to 12 dB	(P/F) Poor/ Flaw – Flaw
>31%	<i>And</i>	> 12 dB	(P/D) Poor/ Defect - Defect

Berdasarkan kecepatan rambat gelombang P yang dihasilkan dari pengujian CSL, akan bervariasi terhadap campuran beton yang berbeda. Namun kecepatan rata-rata gelombang harus mengacu pada tingkat kriteria uji CSL yang dijelaskan pada **Tabel 2.10**.

Tabel 2.10 Karakteristik Hasil Pengujian Crosshole Sonic Logging (CSL)

Penilaian Kinerja Beton			
Penilaian Kinerja Beton	Rating Simbol	Reduksi Kecepatan	Indikasi
Baik	G	$\leq 10\%$	Beton kualitas bagus
Kemungkinan Cacat	Q	$> 10\% \ \& \ < 20\%$	Terjadi kontaminasi beton minor, intrusi atau kualitas beton yang mungkin tidak bagus
Jelek	P/D	$\geq 20\%$	Terjadi cacat, kemungkinan kontaminasi air/ <i>slurry</i> , intrusi tanah atau beton yang tidak bagus
Tidak Ada Sinyal	NS	Tidak ada sinyal diterima	Intrusi tanah atau cacat parah (dengan asumsi bonding antara permukaan pipa dan beton bagus)
Air	W	$V = 1450$ m/dets.d 1525 m/det	Intrusi air atau intrusi air yang bercampur material kasar tanpa atau sedikit material halus.

(Interim, n.d.)

2.4 Pile Driving Analyzer (PDA)

Pile Driving Analyzer (PDA) adalah suatu sistem pengujian dengan menggunakan data digital komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelerometer* untuk memperoleh kurva gaya dan kecepatan ketika tiang dipukul menggunakan palu dengan berat tertentu. Hasil dari pengujian PDA terdiri dari kapasitas tiang, energi palu, penurunan, dll.

Pada umumnya, pengujian dengan metode PDA dilaksanakan setelah tiang mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tumbukan palu.

Metode lain yang dapat digunakan untuk menahan tumbukan adalah dengan menggunakan cushion, merendahkan tinggi jatuh palu & menggunakan palu yang lebih berat.

PDA merekam regangan dan percepatan gelombang yang terjadi akibat tumbukan dari palu yang dijatuhkan diatas kepala tiang dari ketinggian tertentu. Daya dukung tiang dari hasil PDA akan dianalisa lebih lanjut dengan menggunakan program CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*), yaitu metoda untuk menentukan persamaan gelombang berdasarkan parameter tanah aktif akibat beban impact, yang dikembangkan di *Case Western Reserve University*.

Pile driving analyzer (PDA) atau uji beban dinamis memiliki beberapa keuntungan antara lain (Mhaiskar, SY. Dkk, 2010 dan Vaidya, Ravikiran dkk, 2006):

1. Dalam satu hari dapat dilakukan test beberapa tiang sehingga menghemat waktu.
2. PDA membutuhkan ruang relative kecil.
3. PDA dapat mengevaluasi daya dukung dan integritas structural tiang.
4. PDA dapat mengevaluasi penurunan (settlement) tiang.

Dalam metode ASTM D-4945-1996, PDA test ini dilakukan guna untuk mengetahui daya dukung axial tiang. Dari perhitungan, beberapa variabel uji dapat diukur seperti tekanan ultimate bearing, penggabungan tiang, beban maksimum pada tiang uji.

PDA Test pelaksanaannya mengacu pada ASTM D-4945 (*Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*) : "*This test method is used to provide data on strain or force and acceleration, velocity or displacement of a pile under impact force. The data are used to estimate the bearing capacity and the integrity of the pile, as well as hammer performance, pile stresses, and soil dynamic characteristics, such as soil damping coefficients and quake values. This test method is not intended to replace Test Method D 1143.*"

Pengujian dengan metode PDA dilaksanakan setelah tiang mempunyai kekuatan yang cukup untuk menahan tumbukan palu (*hammer*)

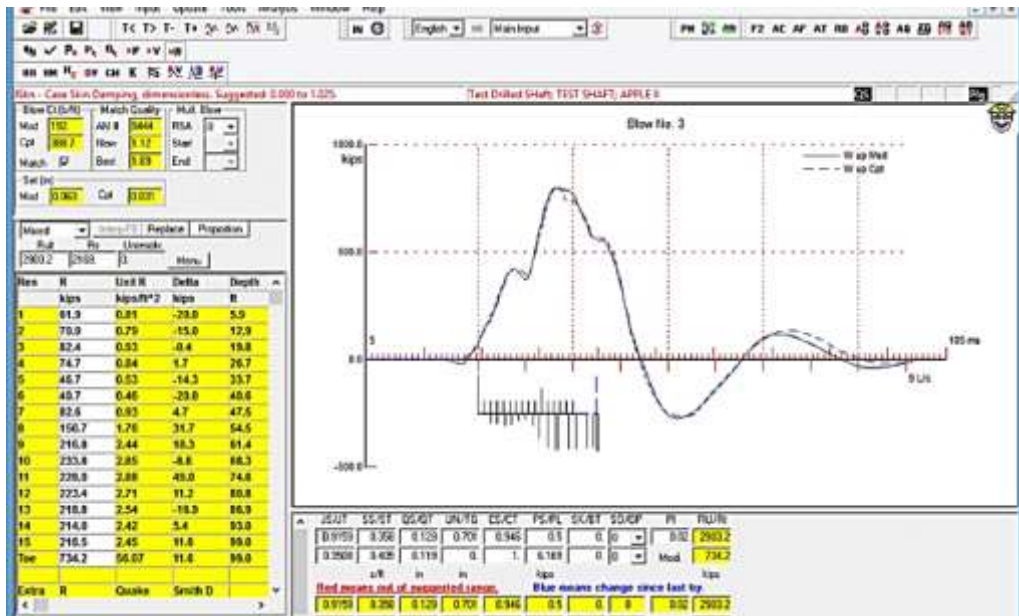
atau umur tiang telah mencapai 28 hari ASTM D-4945-1996). Pada pengujian dengan metode PDA terdapat beberapa parameter pendukung, yaitu:

1. CAPWAP (*Case Wave Analysis Program*)

Analisis lanjutan yang dilakukan bersama dengan pengujian PDA adalah analisis CAPWAP yang merupakan salah satu metode signal matching analysis (SMA). Analisis ini menggunakan data yang diperoleh dari pengujian PDA untuk memberikan hasil analisis yang lebih detail (ASTM D-4945-1996).

Dari analisis 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



Gambar 2. 27 Tampilan CAPWAP

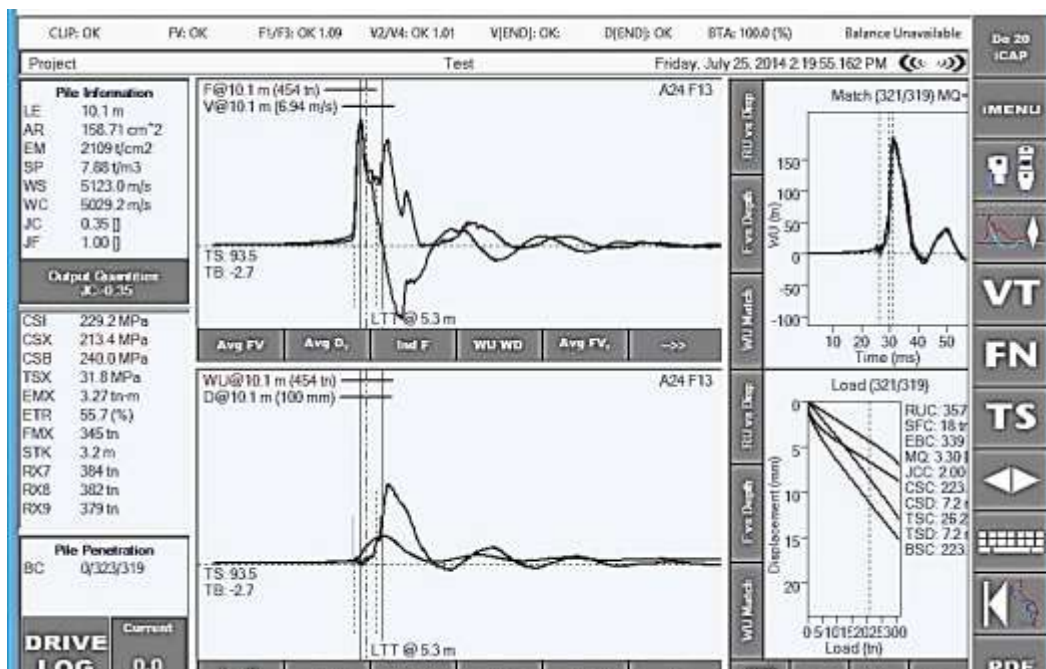
2. Data dan Parameter Pengujian PDA Test

Penghentian re-strike dan perekaman data dilakukan setelah pengujian yakin bahwa hammer telah memberikan energi transfer maksimum yang mampu dilakukannya.



Gambar 2. 28 Alat Uji PDA

(Sumber: pile.com)



Gambar 2. 29 Grafik Hasil Uji PDA

Tabel 2.11 Kode dan Keterangan Pada Alat PDA

KODE	KETERANGAN
BN	Pukulan
RMX	Daya dukung tiang (ton)
FMX	Gaya tekan maksimum (ton)
CTN	Gaya tarik maksimum (ton)
EMX	Energy 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 di bawah instrument (m)
LP	Panjang tiang tertanam (m)
AR	Luas penampang tiang (cm ²)

3. Refusal dan Ultimate

Pada pengujian dengan PDA Test akan diperoleh hasil daya dukung yang bersifat salah satu dari dua kondisi berikut:

- a. Ultimate
- b. Refusal

Pengertian daya dukung yang bersifat refusal adalah daya dukung yang terdeteksi / terdata dan di analisis merupakan daya dukung yang diperoleh dari kondisi pondasi tiang yang belum sepenuhnya termobilisasi. Kondisi belum sepenuhnya termobilisasi adalah kondisi di mana pondasi tiang belum mencapai kapasitas tertinggi atau ultimate-nya. Kondisi ini dapat disebabkan karena pada saat pengujian / re-strike dilakukan, energi yang di transfer tidak cukup besar untuk memobilisasi seluruh kemampuan tahanan atau daya dukung pondasi tiang yang diuji.

Pengertian daya dukung yang bersifat ultimate adalah daya dukung yang diperoleh dari kondisi pondasi tiang yang sudah termobilisasi sepenuhnya (ASTM D-4945-1996).

Dengan demikian angka daya dukung yang dihasilkan dari analisis PDA dan CAPWAP 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:

- a. Telah bergerakinya tiang pancang akibat beban tertentu (beban ultimate) yang berarti terlampauinya tahanan friksi dan ujung dari pondasi tiang.
- b. Telah terlampauinya kemampuan material tiang pancang itu sendiri yang jika diteruskan dengan beban yang lebih berat akan mengakibatkan kegagalan pada bahan / material tiang pancang.

Kedua kondisi tersebut (refusal atau ultimate) dapat diterima selama daya dukung yang diperoleh masih memenuhi syarat faktor keamanan yang dituntut dari desain yang ditetapkan. Dari beberapa data yang diambil pada waktu pelaksanaan pengujian PDA, pada umumnya akan diambil satu grafik dan data yang paling baik dalam mewakili dan menggambarkan kekuatan atau daya dukung pondasi tiang yang diuji. Penentuan data tersebut pada umumnya diambil dari data transfer energi atau energi tersalurkan (EMX) yang paling besar atau maksimum selama pelaksanaan re-strike dan terdata dalam program yang digunakan (ASTM D-4945-1996).

4. Safety Factor

Safety Factor yang digunakan untuk pengujian PDA adalah 2,0.

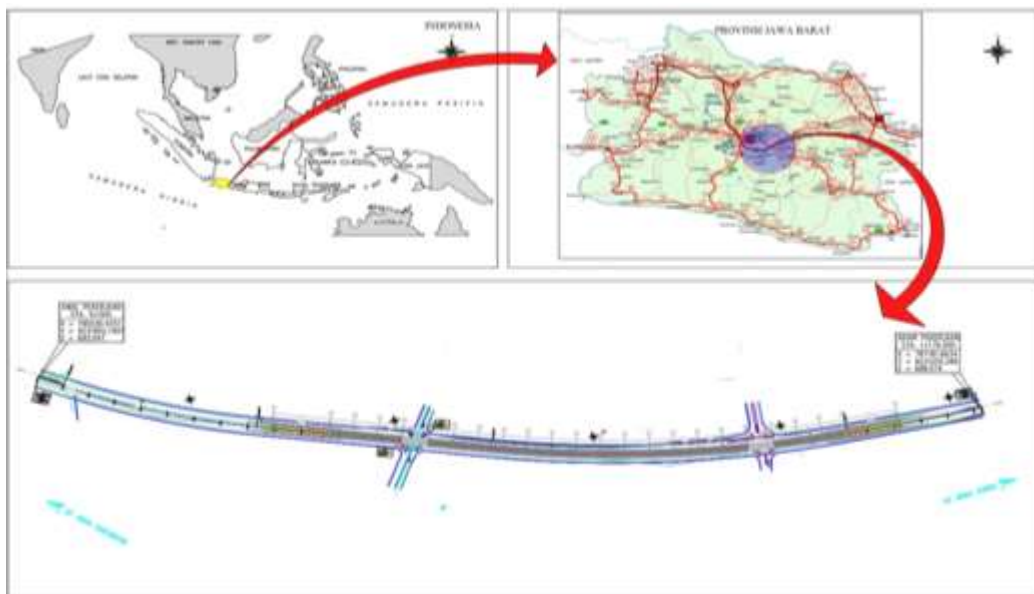
Keterangan:

- a. pengujian dinamis membutuhkan pencocokan sinyal
- b. membutuhkan uji statis yang berhubungan
- c. formula dinamis hanya untuk pasir – bukan lempung
- d. < 2% statis
- e. > 1% statis atau > 3% dinamis
- f. SF lebih tinggi jika <3% dinamis atau <1% statis
- g. “SF rendah jika >15% dinamis atau >3% statis, dan investigasi lokasi ekstensif dengan kontrol konstruksi yang cermat”
- h. “tergantung pada jenis tiang, variabilitas lokasi, kondisi beban,dll”
- i. tidak secara khusus ditujukan NA tidak dapat diterapkan NR tidak direkomendasikan

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Data Umum Proyek

1.	Nama Pekerjaan	:	Pembangunan <i>Fly Over</i> Kopo
2.	Lokasi	:	Persimpangan sebidang Jalan Raya Kopo – Persimpangan Cibaduyut Jl. Soekarno Hatta (Bandung), Jawa Barat
3.	Tanggal SPMK	:	13 November 2020
4.	Tanggal Selesai Pekerjaan	:	2 September 2022
5.	Pemilik Proyek	:	Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
6.	Kontraktor	:	PT. Pembangunan Perumahan (persero). Tbk
7.	Konsultan Perencana	:	PT. Yodya Karya
8.	Konsultan Supervisi	:	PT. Perentjana Djaja & PT. Diantama Rekanusa (KSO)
9.	Jenis Kontrak	:	Harga Satuan
10.	Nomor Kontrak	:	KU.03.03/PJNWILIV-PK4.5/XI/219.01



Gambar 3. 1 Letak Proyek Secara Umum

(Sumber : (PT Yodya Karya (Pesero), 2017))

3.2 Data Teknis *Bored Pile*

Data ini diperoleh dari pihak supervisor dengan data sebagai berikut:

a. Pengujian Pile Integrity Test

No Tiang	Dimensi Tiang (cm)	Tipe Tiang	Panjang Tiang (m)	Tanggal Uji
P-10 BP-5	D-120	Bore Pile	28,3	10 Agustus 2021

b. Pengujian Crosshole Sonic Logging

No Tiang	Dimensi Tiang (cm)	Tipe Tiang	Panjang Tiang (m)	Jumlah Pipa	Jarak Antar Pipa (cm)	Kedalaman Pipa (m)	Tanggal Uji
P-10 BP-5	D-120	Bore Pile	28,3	4	60	26,3	31 Mei 2021

c. Pengujian Pile Driving Analyzer

No Tiang	Dimensi Tiang (cm)	Tipe Tiang	Panjang Tiang (m)	Panjang tiang tertanam ₁	Panjang Tiang Tertanam ₂	Hammer	Tanggal Uji
P-10 BP-5	D-120	Bore Pile	28,3	26,3	25,8	Drop Hammer (13 ton)	4 Agustus 2021

Catatan:

Panjang Tiang : Total panjang tiang dari kepala s/d ujung tiang

Panjang Tiang Tertanam₁ : Total panjang tiang dari lokasi sensor s/d ujung tiang

Panjang Tiang Tertanam₂ : Total panjang tiang dari tanah terbawah s/d ujung tiang

3.3 Metode Pengumpulan Data

Untuk mencapai maksud dan tujuan studi ini, dilakukan beberapa tahapan yang dianggap perlu dan secara garis besar diuraikan sebagai berikut:

1. Tahapan pertama adalah melakukan review dan studi kepustakaan terhadap buku teks dan jurnal-jurnal yang terkait dengan pondasi Bored Pile, daya dukung pondasi, permasalahan pada pondasi Bored Pile serta desain dan tata cara pelaksanaan pemboran tiang.
2. Tahapan kedua adalah peninjauan langsung ke lokasi proyek dan menentukan lokasi pengambilan data yang tersedia.
3. Tahap ketiga mengumpulkan data-data dari pihak konsultan, supervisi dan pelaksana lapangan.

Adapun data-data yang diperoleh yaitu:

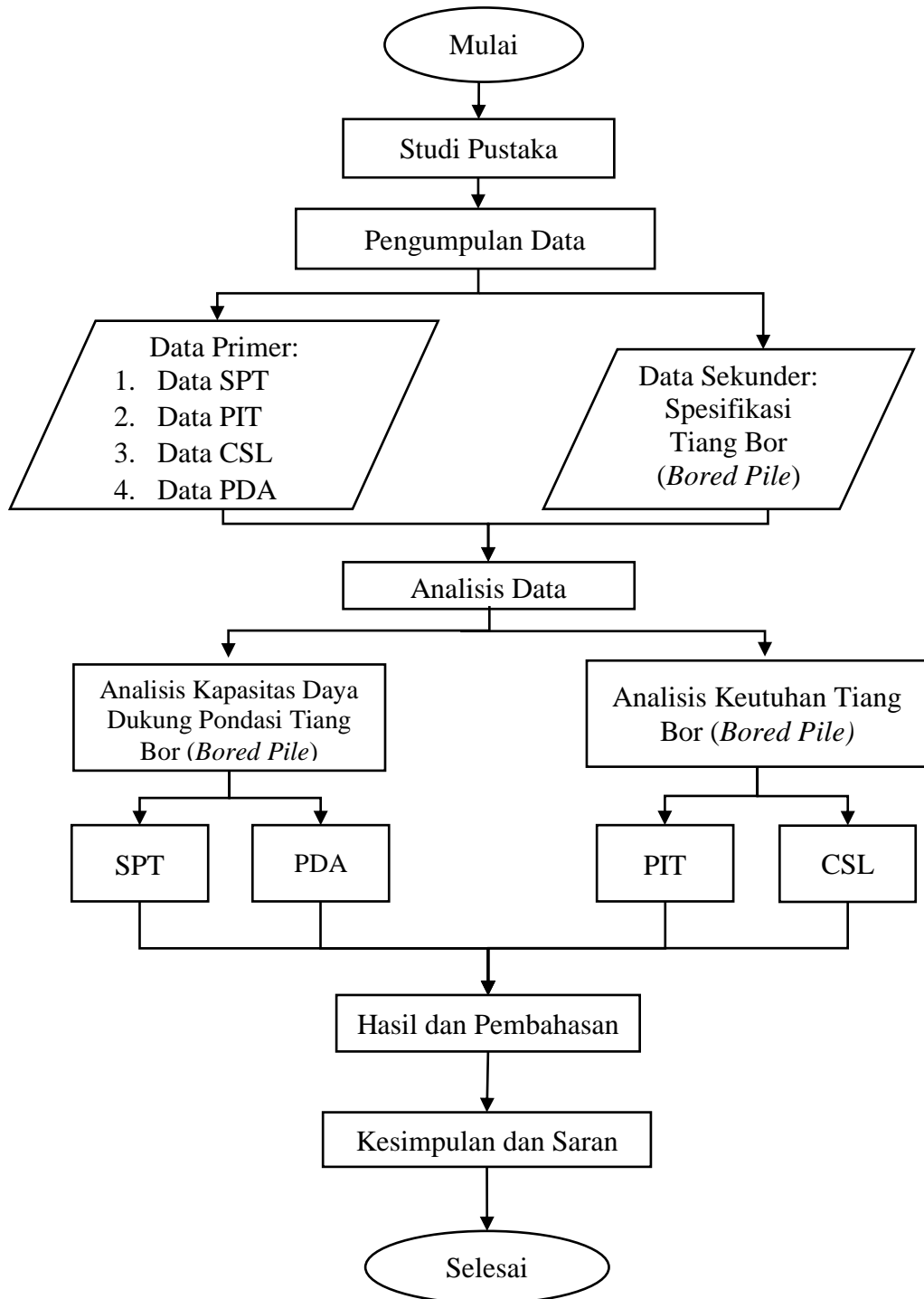
- a. Data pengujian SPT, PIT, CSL dan PDA.
 - b. Gambar kerja dan detail pondasi.
4. Tahap keempat adalah menganalisis data dengan menggunakan data data di atas berdasarkan formula yang ada.
 5. Tahap kelima menganalisis terhadap hasil perhitungan yang dilakukan dan membuat kesimpulan.

3.4 Analisis Data

Setelah melakukan pengolahan hasil uji, hasilnya akan dianalisis untuk mendapatkan integritas tiang dari setiap pengujian yang terdiri dari perhitungan kapasitas daya dukung pengujian statis yaitu SPT menggunakan metode *Reese & Wright*, dan pengujian dinamis yaitu PIT, CSL dan PDA.

Setelah itu dilakukan perbandingan nilai hasil uji keutuhan tiang menggunakan CSL dan PIT dengan nilai hasil kapasitas daya dukung dengan data SPT dan PDA.

3.5 Flowchart Metode Penelitian



Gambar 3. 2 Flowchart Penelitian

BAB IV
ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pendahuluan

Pada bab ini, akan dibahas mengenai metode perhitungan daya dukung yang telah disampaikan pada Bab II. Daya dukung tiang akan dihitung menggunakan data SPT yaitu jumlah pukulan palu (*N-Value*), hasil pengujian PIT, CSL dan PDA. Beban rencana yang akan dipikul struktur pondasi adalah seperti uraian berikut:

a. Deskripsi Umum:

Pondasi/ Pier	Jumlah Titik Bored Pile	Ø (mm)	L (mm)
P.9	16	1200	24000
P.10	16	1200	25000

b. Material

Mutu Beton		Kekuatan Tekan Minimal Karakteristik (kg/cm ²)		Penggunaan Pada Struktur
f _c (MPa)	b _k (kg/cm ²)	Benda Uji Silinder 15cm x 30cm	Benda Uji Kubus 15 x 15 x 15 cm ²	
30	K-350	300	350	<ul style="list-style-type: none"> • Pier Leg, Pilehead Pileslab, Pilecap • Bored Pile dan isian pancang • Slab dan Abutment

PENULANGAN		
Diameter	:	> 13 mm
Mutu	:	BJTD 40
Selimit Beton Badan	:	25 mm
Selimit Beton Atas/ Bawah	:	1 m

4.2 Menghitung Kapasitas Daya Dukung *Bored Pile*

Kapasitas daya dukung *bored pile* dihitung berdasarkan data SPT, CSL dan PDA.

4.2.1 Menghitung Daya Dukung *Bored Pile* Berdasarkan Data SPT

Tujuan dari pengujian bor dalam dan SPT ini adalah untuk mengumpulkan data berupa jenis tanah, kepadatan tanah yang dinyatakan dalam nilai SPT dan elevasi muka air, untuk mengetahui sifat karakteristik dan mekanik tanah dasar pada setiap lokasi perencanaan pekerjaan.

Tabel 4.1 Statigrafi Lapisan Tanah Berdasarkan Nilai N-SPT

MAT	-8,0	-3,0	-3,0	-3,5	-3,0	-3	-3,0	-3,0	-18,0	-3,0	-6,0	-3,0	-3,0	-8,0
Depth	A1	P2	P3	P5	P6	P8	P10	P11	P13	P15	P16	P18	P19	A2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	9	42	14	7	8	13	8	8	18	17	2	25	60	9
-4	10	30	12	27	11	14	10	10	15	41	17	34	17	10
-6	22	5	16	3	26	17	12	44	46	51	2	60	60	22
-8	60	58	17	32	42	10	20	18	36	34	38	60	60	60
-10	24	60	22	53	53	60	40	21	50	37	19	34	60	24
-12	27	17	22	56	56	60	60	51	55	60	60	56	60	27
-14	60	60	42	60	60	20	60	60	60	60	60	60	60	60
-16	60	60	59	60	60	22	60	60	60	60	60	60	60	60
-18	60	60	60	60	60	24	60	60	60	60	60	60	60	60
-20	60	60	60	60	60	52	60	60	60	60	60	60	60	60
-22	60	60	39	60	60	57	60	60	60	60	60	60	60	60
-24	60	60	43	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
-26	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
-28	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
-30	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
-32	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
N rata rata	44	48	38	46	47	36	44	44	48	49	43	51	54	44
Site Class	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Keterangan:

	= Sangat Urai - Urai		= Sangat lunak - lunak
	= Agak Padat		= Teguh - Sangat Teguh
	= Padat		= Tanah Keras
	= Sangat Padat		= Tanah sangat Keras

Berdasarkan data borlog yang ditemukan di semua titik borlog, tanah pada lokasi pengeboran terdiri dari tanah lempung dan pasir dengan konsistensi padat/ kaku.

Dapat ditarik kesimpulan pada titik P10 terdiri dari lapisan tanah berjenis lempung dari permukaan hingga kedalaman 20 meter dengan sisipan batu pasir setebal 1 meter pada kedalaman 14 meter, lalu lempung pasir juga ditemukan pada kedalaman 27 meter hingga 33 meter, kemudian tanah berjenis pasir dari kedalaman 20 meter hingga kedalaman 27 meter.

Perhitungan kapasitas daya dukung *Bored Pile* dari data SPT memakai metode *Reese & Wright* dan data diambil pada titik P10.

Data *Bored Pile*:

$$\text{Diameter Tiang (d)} = 120 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Keliling Tiang (p)} &= \pi \cdot d \\ &= 3,14 \cdot 120 \text{ cm} \\ &= 376,8 \text{ cm} = 3,768 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas } Bored \text{ Pile} &= \frac{1}{4} \pi d^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 120^2 \\ &= 1.130 \text{ cm}^2 = 1,130 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- 1) Dari persamaan (2.3) **daya dukung ultimit pada ujung *Bored Pile* tanah kohesif** dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

Dengan:

$$Q_p = \text{tahanan ujung per satuan luas (ton/m}^2\text{)}$$

$$A_p = \text{luas penampang pondasi (m}^2\text{)}$$

$$A_p = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$A_p = \frac{1}{4} \times \pi \times 1,2^2 = 1,130 \text{ m}^2$$

Diambil sampel lapisan tanah pada kedalaman 4 m (jenis tanah lempung) untuk perhitungan **tanah kohesif**:

$$q_p = 9 \cdot C_u$$

Dengan:

$$C_u = \text{kohesi tanah undrained (ton/m}^2\text{)}$$

$$C_u = \frac{2}{3} N_{spt} 10$$

$$= \frac{2}{3} \times 10 \times 10$$

$$= 66,6 \text{ kN/m}^2 = 6,8 \text{ ton/m}^2$$

$$q_p = 9 \cdot 66,6$$

$$= 599,4 \text{ kN/m}^2 = 61,1 \text{ ton/m}^2$$

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$= 599,4 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,13 \text{ m}^2$$

$$= 677 \text{ Kn} = 69 \text{ ton}$$

Untuk daya dukung ujung pada tanah **non kohesif** menggunakan persamaan (2.6) dan (2.7).

$$Q_p = \frac{40}{0,3048^2} A_p \text{ untuk } N_{SPT} > 60$$

$$Q_p = \frac{2}{3} \times \frac{1}{0,3048^2} N \cdot A_p \text{ untuk } N_{SPT} \leq 60$$

Dengan:

$$A_p = \text{luas penampang pondasi (m}^2\text{)}$$

$$N = \text{nilai } N_{spt} \text{ tanah}$$

Untuk perhitungan tanah **non kohesif** dipilih lapisan tanah pada kedalaman 24 m (jenis tanah pasir) dengan nilai $N_{spt} = 60$, maka digunakan persamaan:

$$Q_p = \frac{2}{3} \times \frac{1}{0,3048^2} N \cdot A_p$$

$$Q_p = \frac{2}{3} \times \frac{1}{0,3048^2} \times 60 \times 1,13$$

$$Q_p = 486,53 \text{ Kn} = 49 \text{ ton}$$

- 2) Dari persamaan (2.8) **daya dukung selimut** pada tanah kohesif dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_s = C_u \times \alpha \times p \times \Delta l$$

Dengan:

α = faktor koreksi

p = keliling pondasi Bored Pile (m)

Δl = kedalaman tiang yang ditinjau (m)

Diambil sampel lapisan tanah pada kedalaman 4 m (jenis tanah lempung) untuk perhitungan **tanah kohesif**:

$$Q_s = C_u \times \alpha \times p \times \Delta l$$

$$Q_s = 6,8 \times 0,55 \times 3,768 \times (4 - 2)$$

$$Q_s = 28,18 \text{ ton}$$

Untuk daya dukung ujung pada tanah **non kohesif** menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10).

$$Q_s = 0,32 \times N \times p \times \Delta l \text{ untuk } N_{\text{SPT}} < 53$$

$$Q_s = \frac{N-53}{450} \times \frac{1}{0,3048^2} \times p \times \Delta l \text{ untuk } N_{\text{SPT}} \geq 53$$

Untuk perhitungan tanah **non kohesif** dipilih lapisan tanah pada kedalaman 24 m (jenis tanah pasir) dengan nilai $N_{\text{spt}} = 60$, maka digunakan persamaan:

$$Q_s = \frac{N-53}{450} \times \frac{1}{0,3048^2} \times p \times \Delta l \text{ untuk } N_{\text{SPT}} \geq 53$$

$$Q_s = \frac{60-53}{450} \times \frac{1}{0,3048^2} \times 3,768 \times (22 - 20)$$

$$Q_s = 1,26 \text{ ton}$$

- 3) Daya dukung ultimit pada tanah kohesif dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s$$

$$= 69 + 28$$

$$= 97 \text{ ton}$$

Daya dukung ultimit pada tanah non kohesif dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Q_u &= Q_p + Q_s \\ &= 49 + 1101 \\ &= 1151 \text{ ton} \end{aligned}$$

Untuk kedalaman dan lapisan tanah selanjutnya dapat dilihat pada tabel dibawah.

Tabel 4.2 Daya Dukung Tiang Tunggal Bored Pile P-10 berdasarkan data SPT

Depth (m)	Soil Description	Soil Layer	N	α	C _u (ton/m ²)	Skin Friction, Q _s (ton)		End Bearing, Q _p (ton)	Q _{ultimate} (ton)	Q _a (ton)
						Local	Cumm			
0	Lempung Berpasir	1	0	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
2	Lempung Berpasir	2	8	0.55	5.44	22.54	22.54	5.64	28.18	14
4	Lempung	3	10	0.55	6.80	28.18	50.72	7.05	57.77	29
6	Lempung	3	12	0.55	8.16	33.81	84.53	8.46	92.99	46
8	Lempung Berpasir	4	20	0.55	13.60	56.35	140.88	14.10	154.98	77
10	Lempung Berpasir	4	40	0.55	27.19	112.71	253.59	28.20	281.79	141
12	Lempung Berpasir	4	60	0.55	40.79	169.06	422.65	42.30	464.95	232
14	Lempung Berpasir	4	60	0.55	40.79	169.06	591.71	42.30	634.01	317
16	Lempung Berpasir	4	60	0.55	40.79	169.06	760.77	42.30	803.07	402
18	Lempung Berpasir	4	60	0.55	40.79	169.06	929.83	42.30	972.13	486
20	Lempung Berpasir	4	60	0.55	40.79	169.06	1098.90	42.30	1141.20	571
22	Pasir lempungan	5	60	0	40.79	1.26	1100.16	49.61	1149.77	575
24	Pasir lempungan	5	60	0	40.79	1.26	1101.42	49.61	1151.03	576
26	Lempung Berpasir	6	60	0.55	40.79	169.06	1270.48	42.300	1312.78	656
28	Lempung Berpasir	6	60	0.55	40.79	169.06	1439.54	42.300	1481.84	741
30	Lempung Berpasir	6	60	0.55	40.79	169.06	1608.60	42.300	1650.90	825
32	Lempung Berpasir	6	60	0.55	40.79	169.06	1777.66	42.300	1819.96	910

4.2.2 Daya Dukung *Bored Pile* Berdasarkan Hasil PDA

Uji PDA dilakukan dengan memberikan benturan kepada kepala tiang menggunakan hammer yang sesuai dan tinggi jatuh yang cukup agar menghasilkan energy dan tegangan yang diharapkan. Data hasil PDA akan dianalisis lebih lanjut menggunakan program CAPWAP untuk mensimulasikan distribusi beban sepanjang tiang dan kurva beban-penurunan.

Hasil PDA dan analisis CAPWAP dirangkum pada **Tabel 4.2** dan **Tabel 4.3** berikut:

Tabel 4.3 Energi Hammer & Tegangan

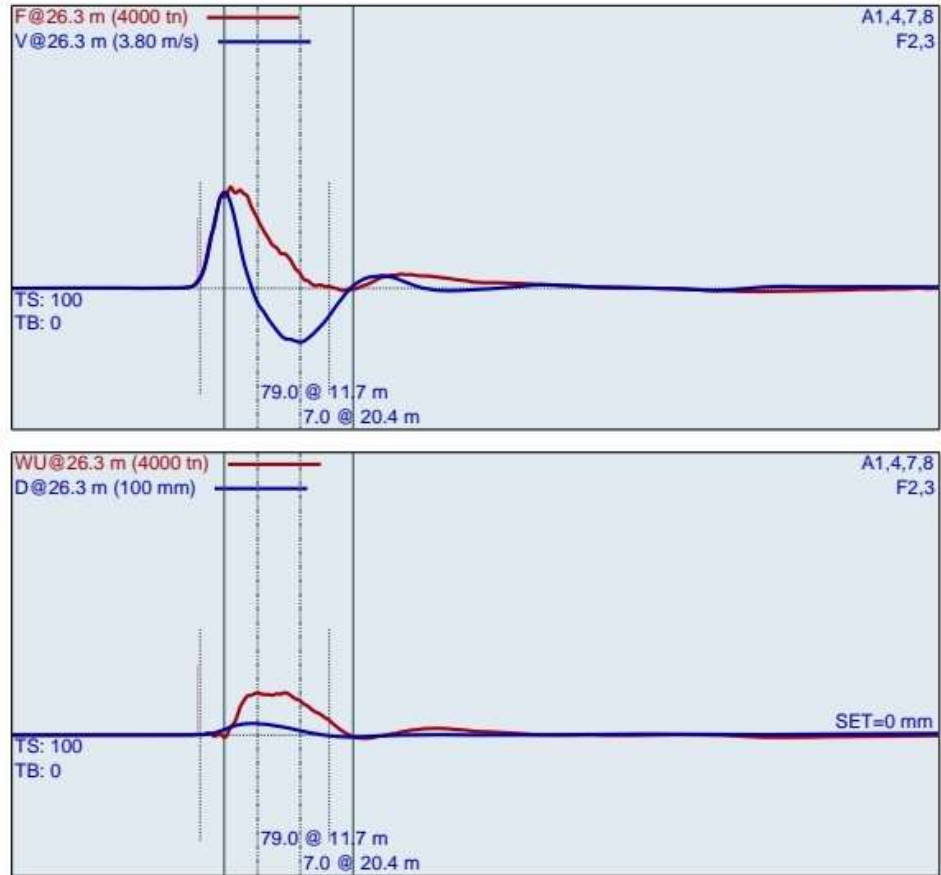
No Tiang	Berat Hammer (ton)	Tinggi Jatuh (m)	Energi Hammer (ton-m)	Tgengan Tekan (MPa)	Tegangan Tarik (MPa)
P-10 BP-5	13,0	2,0	4,73	12,4	3,1

Tabel 4.4 Daya Dukung Bored Pile Berdasarkan Tes PDA

No Tiang	PDA	Hasil Analisis CAPWAP			
	Daya Dukung	Daya Dukung			Displacement
		Total	Friksi	End Bearing	Total
	(ton)	(ton)	(ton)	(ton)	(mm)
P-10 BP-5	929	1418	1338	79	6,5

PT EFEMKA REKAYASA GEOTEKNIK
Pile Driving Analyzer ® (PDA)
 FO KOPO

P-10 BP-5



Project Information

PROJECT: FO KOPO
 PILE NAME: P-10 BP-5
 DESC: BORED 1200 #675 T #DH 13 T
 PDA OWNER: PT EFEMKA REKAYASA GEOTEKNIK
 SERIAL NUMBER: 5097 LE
 OPERATOR: KJ
 FILE: tmp8656.PDA
 10Agust2021 04:26:37
 Blow number 3

Quantity Results

RMX 491 tn
 RSU 929 tn
 EMX 4.73 tn-m
 STK 0.0 m
 CSX 12.4 MPa
 TSX 3.1 MPa
 FMX 1433 tn
 DMX 4 mm
 DFN 0 mm
 BTA 7.0 %

Sensors

A1 (PE): [64538] 1020 g/s/volt (0.95) VF6
 F2 : [T195] 149.7 PDICAL (1.05) FF6
 F3 : [T196] 148.8 PDICAL (1.05) FF6
 A4 (PE): [64536] 1045 g/s/volt (0.95) VF6
 A7 (PR): [K11247] 410 mv/6.4v/5000g (0.95) VF6
 A8 (PR): [K11248] 390 mv/6.4v/5000g (0.95) VF6
 CLIP: OK

Pile Properties

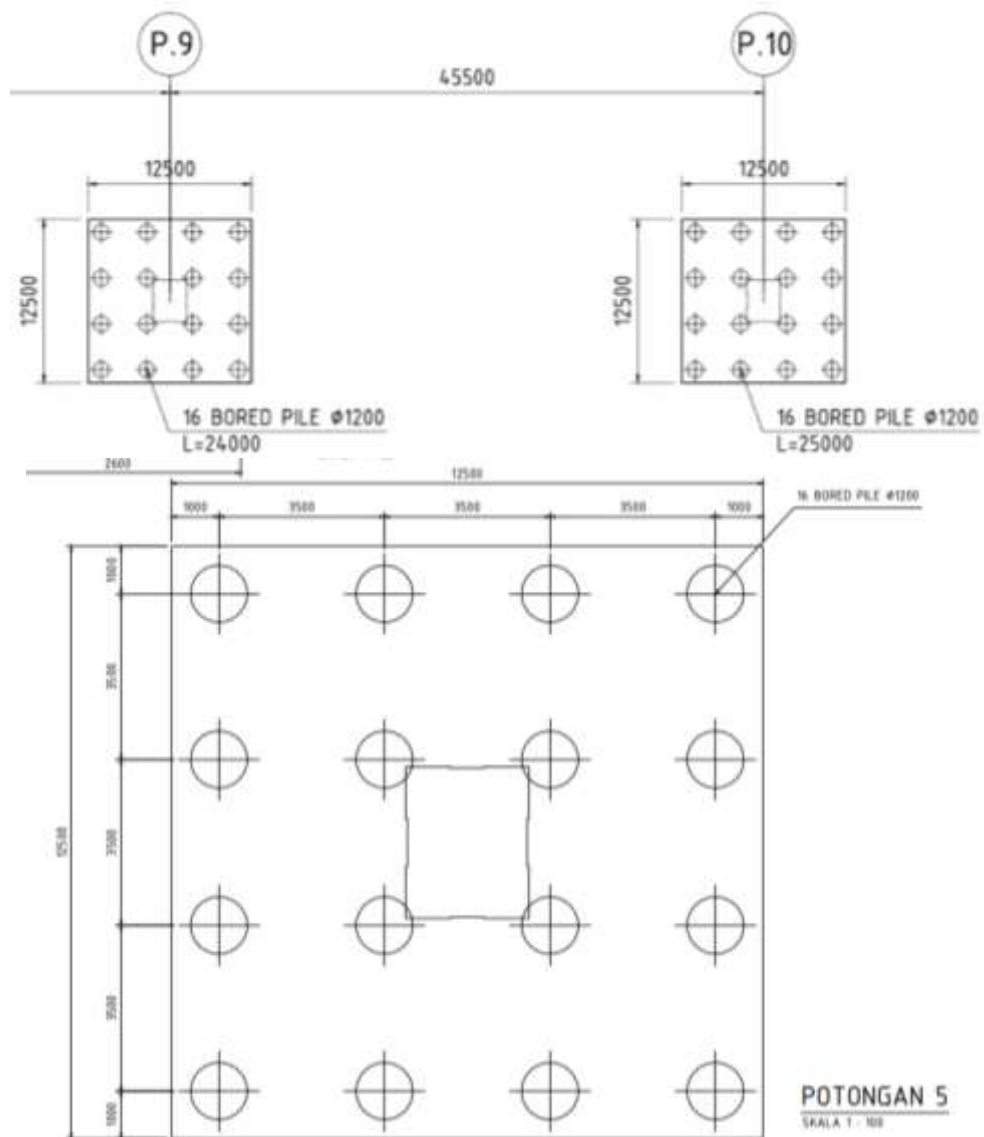
LE 26.3 m
 AR 11309.73 cm²
 EM 354 t/cm²
 SP 2.40 t/m³
 WS 3800.0 m/s
 WC 3784.2 m/s
 EA/C 1053.0 tn-s/m
 2L/C 13.90 ms
 JC 0.60
 LP 25.8 m

Gambar 4. 1 Hasil PDA

Tabel 4.5 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Bored Pile P-10 BP-5 Kedalaman 24m

Metode	Analisis		
	Daya Dukung Ujung Tiang (ton)	Daya Dukung Selimut (ton)	Daya Dukung Ultimit (ton)
SPT	49	1 101	1 151
PDA	79	1 338	418

4.2.3 Perhitungan Kapasitas Daya Dukung Aksial Kelompok



Gambar 4. 2 Denah Lokasi Tiang

1. Metode *Converse – Labarre*

Efisiensi kelompok tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n - 1)m + (m - 1)n}{90mn}$$

Dengan:

m = jumlah baris tiang

n = jumlah tiang dalam satu baris

θ = Arc tg D/S (°)

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n - 1)m + (m - 1)n}{90mn}$$

$$Eg = 1 - \left(\text{arc tg } \frac{120}{350} \right) \times \frac{(4 - 1)4 + (4 - 1)4}{90 \times 4 \times 4}$$

$$Eg = 1 - 0,31 = 0,68 = 68\%$$

2. Metode *Los Angeles Group*

Persamaan efisiensi kelompok tiang berdasarkan metode *Los Angeles Group* adalah sebagai berikut:

$$Eg = 1 - \frac{d}{\pi \cdot s \cdot m \cdot n} \left[m(n - 1) + n(m - 1) + \sqrt{2(n - 1)(m - 1)} \right]$$

Dengan:

d = diameter pondasi (cm)

s = jarak pusat ke pusat tiang (cm)

$$Eg = 1 - \frac{d}{\pi \cdot s \cdot m \cdot n} \left[m(n - 1) + n(m - 1) + \sqrt{2(n - 1)(m - 1)} \right]$$

$$Eg = 1 - \frac{120}{\pi \cdot 350 \cdot 4 \cdot 4} \left[4(4 - 1) + 4(4 - 1) + \sqrt{2(4 - 1)(4 - 1)} \right]$$

$$Eg = 1 - 0,19$$

$$Eg = 0,81 = 81\%$$

3. Seiler – Keeney Formula

Efisiensi kelompok tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$Eg = \left\{ 1 - \left[\frac{11s}{7(s^2 - 1)} \right] \left[\frac{m + n - 2}{m + n - 1} \right] \right\} + \frac{0,3}{m + n}$$

$$Eg = \left\{ 1 - \left[\frac{11 (350)}{7(350^2 - 1)} \right] \left[\frac{4 + 4 - 2}{4 + 4 - 1} \right] \right\} + \frac{0,3}{4 + 4}$$

$$Eg = 1,03 = 103 \%$$

Maka, daya dukung *ultimate* kelompok tiang (persamaan 2.30) yaitu:

$$Q_g = E_g \cdot n \cdot Q_u$$

Diambil nilai E_g paling rendah yaitu menggunakan metode *Converse Labarre* sebesar 0,68

$$Q_g \text{ PDA} = 0,68 \times 16 \times 1418$$

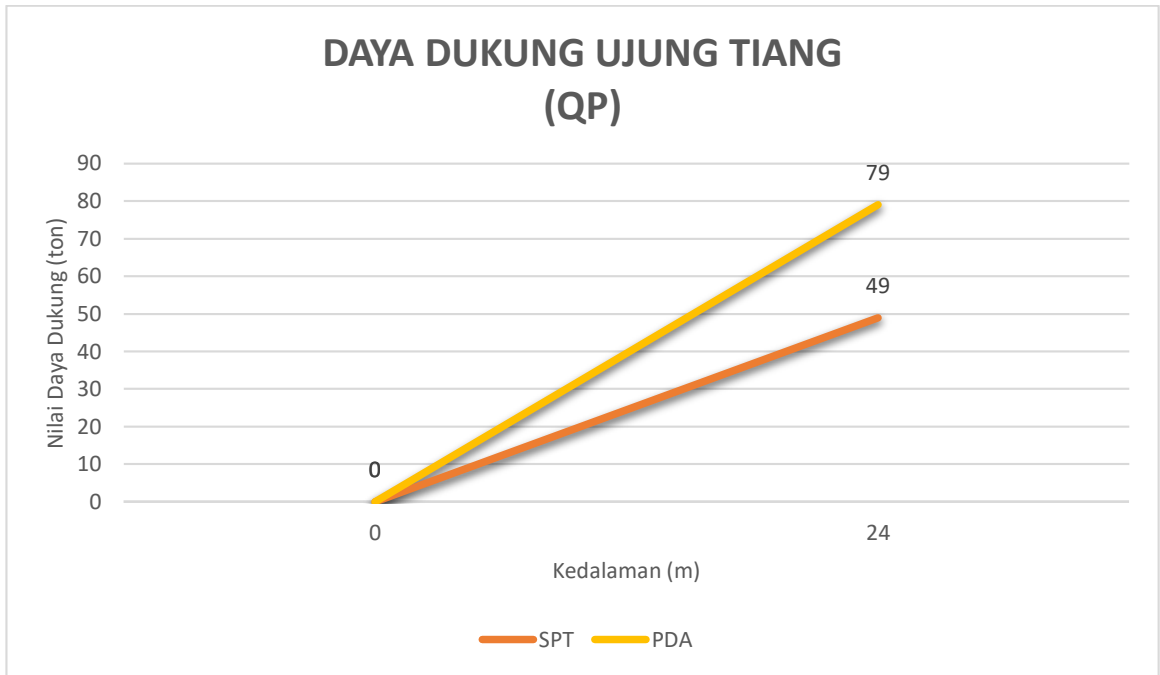
$$Q_g \text{ PDA} = 15.427 \text{ ton}$$

$$Q_g \text{ SPT} = 0,68 \times 16 \times 1151$$

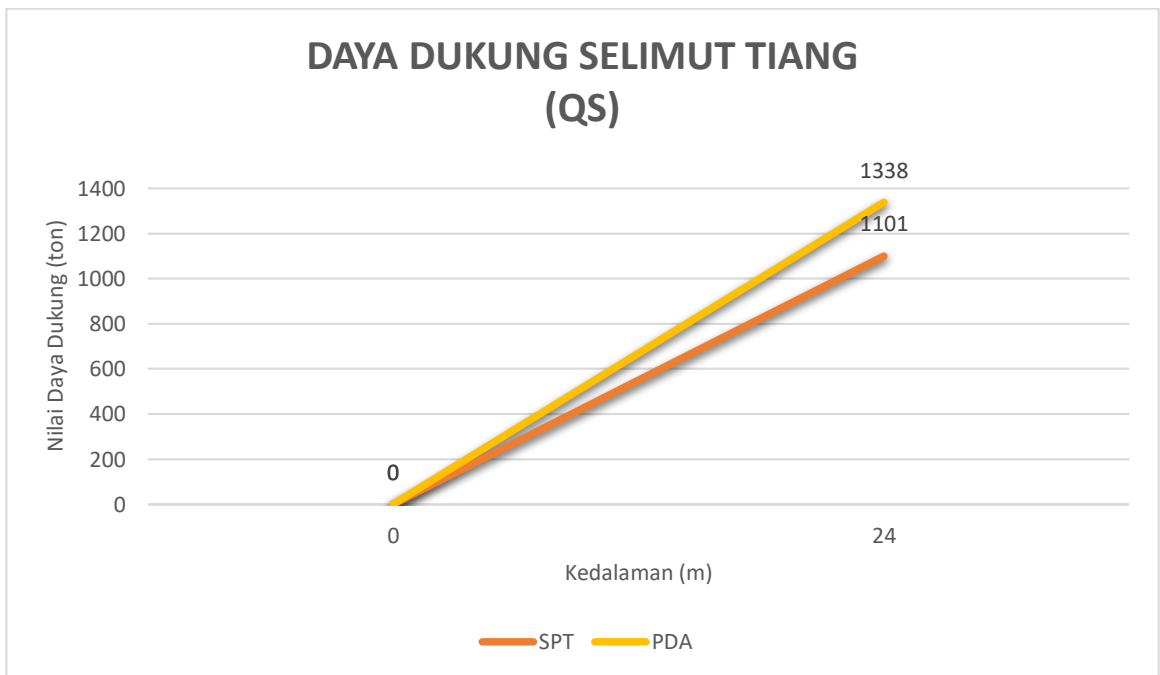
$$Q_g \text{ SPT} = 12.512 \text{ ton}$$

Tabel 4.6 Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Kelompok Tiang Bored Pile P-10 BP-5 Kedalaman 24m

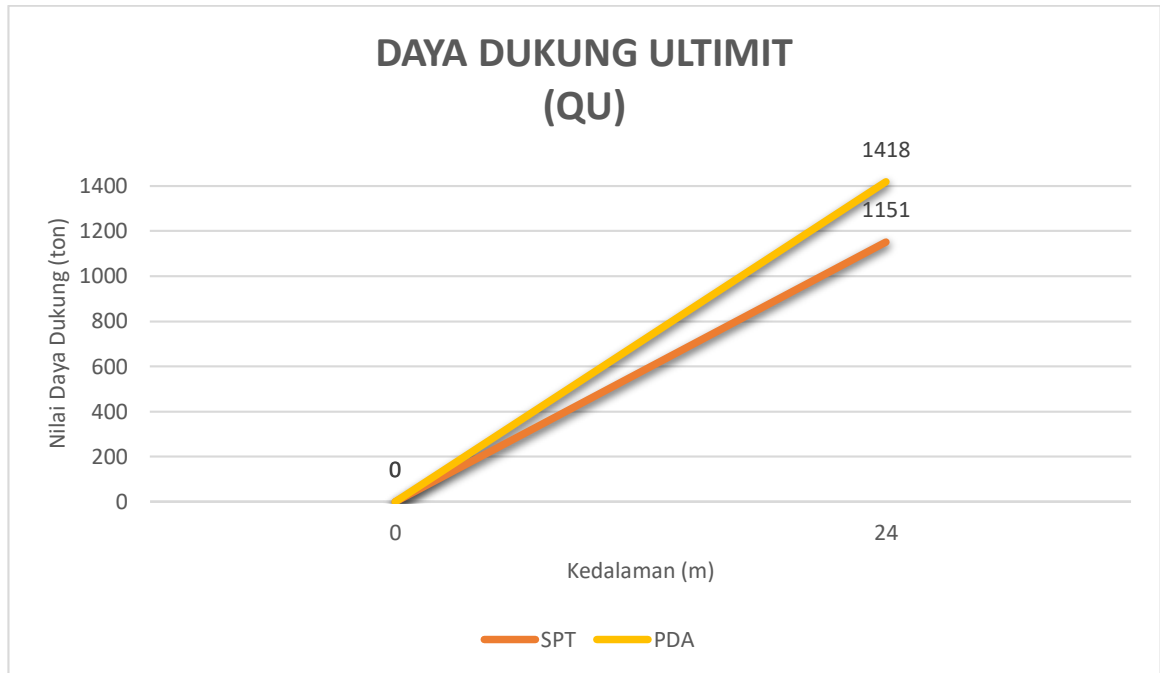
Metode	Analisis			
	Daya Dukung Ujung Tiang (ton)	Daya Dukung Selimut (ton)	Daya Dukung Ultimit (ton)	Daya Dukung Ultimit Kelompok Tiang (ton)
SPT	49	1 101	1 151	12 512
PDA	79	1 338	1 418	15 427



Grafik 4. 1 Perbandingan Daya Dukung Ujung Tiang Metode SPT dan PDA



Grafik 4. 2 Perbandingan Daya Dukung Selimut Tiang Metode SPT dan PDA



Grafik 4. 3 Perbandingan Daya Dukung Ultimit Tiang Metode SPT dan PDA

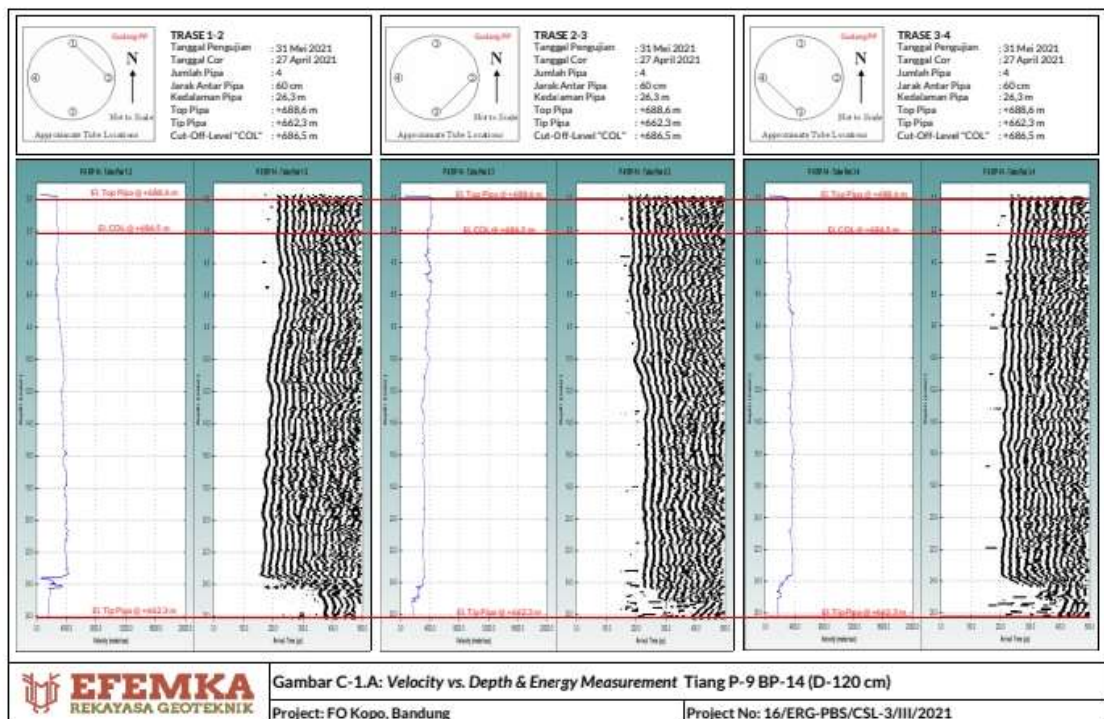
4.3 Hasil Pengujian CSL

Gelombang ultra sonic yang dipancarkan oleh probe pemancar dan diterima oleh probe penerima diteruskan ke komputer sonic integrity tester. Selanjutnya, sinyal ultra sonic yang diterima di-digitasi oleh komputer lalu diplotkan dalam bentuk grafik. Sumbu X menunjukkan waktu rambat dan sumbu Y menunjukkan kedalaman tiang. Kerapatan grafik yang diperoleh mengidentifikasi homogenitas beton dalam arah yang diuji.

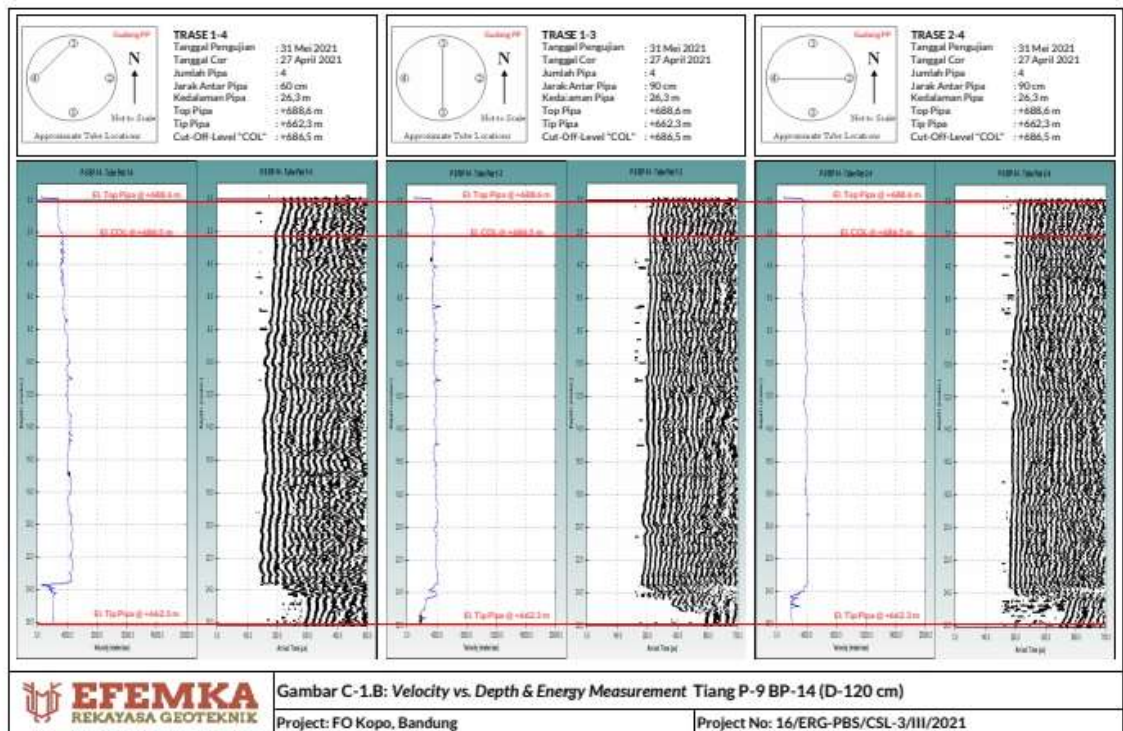
Dalam beton yang homogen dan tidak ada kerusakan, kecepatan gelombang ultra sonic akan selalu konstan. Kecepatan gelombang ultra sonic yang meningkat secara tiba-tiba (waktu rambat lebih pendek) menandakan adanya area beton yang lebih rendah mutunya. Kehilangan jejak rambat gelombang ultra sonic menandakan adanya kerusakan/retak/void pada beton dalam arah rambat gelombang ultra sonic di antara dua pipa uji.

Hasil CSL untuk tiang bor P-9 BP-14 menunjukkan:

- Cepat rambat gelombang terukur yang relatif baik dan seragam pada badan tiang (Good (G)/ No signal distortion and decrease in signal velocity of 10% or less are indicative of good quality concrete)
- Pada seluruh trase terjadi pengurangan kecepatan terukur di bagian bawah tiang atau sekitar 200 cm terbawah, dimana hal ini bisa terjadi akibat potensi adanya beton lemah (campuran beton dengan lumpur)



Gambar 4. 3 Grafik Hasil Crosshole Sonic Logging (CSL)



Gambar 4. 4 Grafik Hasil CSL Titik 2.A

4.4 Hasil Pengujian PIT

Dengan memasukkan kecepatan gelombang tekan dan mengalikannya dengan waktu rambat akan diperoleh kedalaman/panjang tiang, sehingga hasil uji PIT berupa grafik kecepatan terhadap panjang/kedalaman tiang yang seketika itu juga ditampilkan di monitor komputer. Pengujian pada satu tiang dilakukan dengan beberapa kali pemukulan sampai diperoleh grafik hasil uji yang konsisten. (Gambar 4.5)

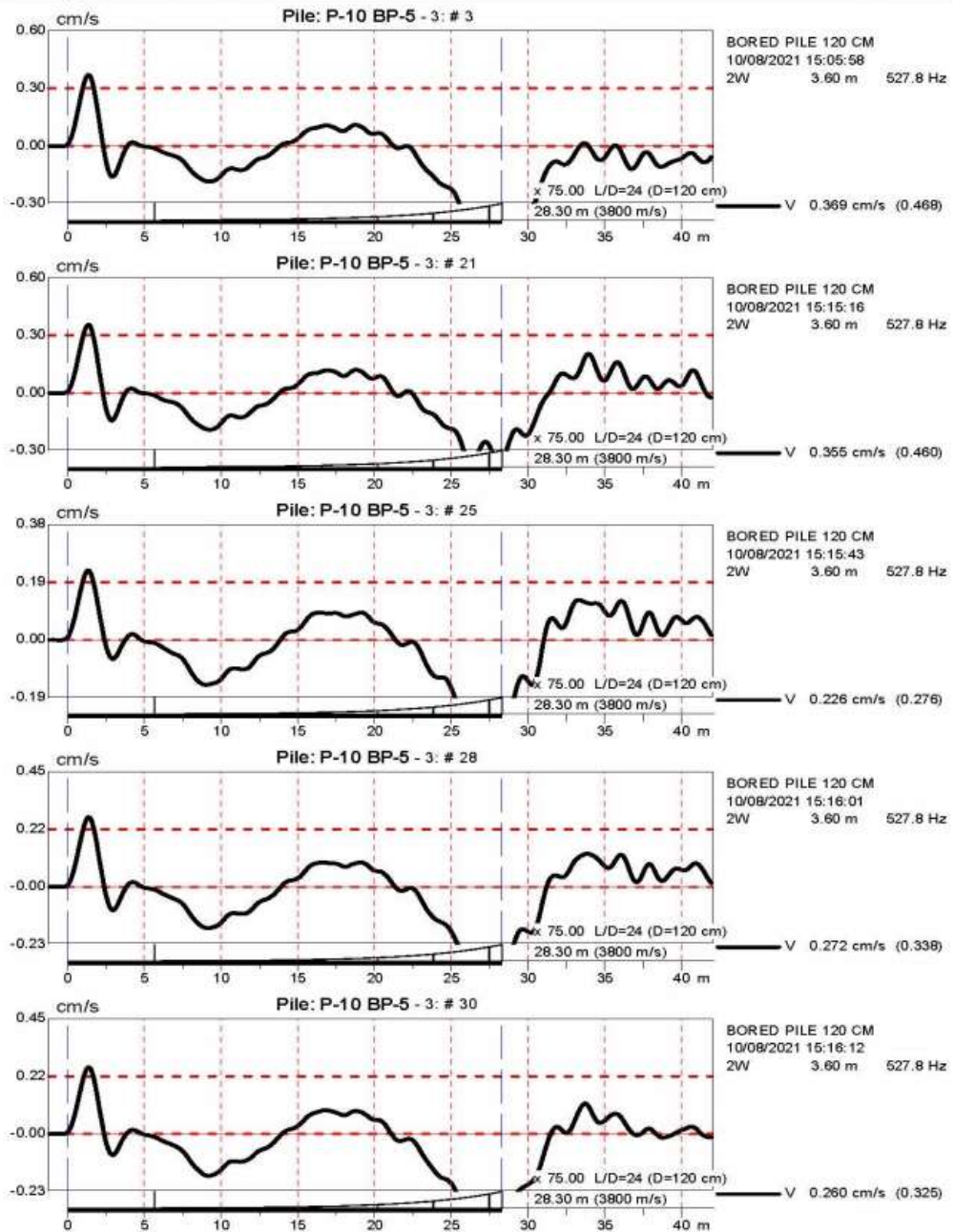
Tabel 4.7 Hasil Uji PIT

No Tiang	Diskusi	Klasifikasi
P-10 BP-5	Terlihat adanya indikasi kenaikan impedansi di kedalaman \pm 5-14 m (potensi akibat friksi tanah/ pembesaran tiang). Ujung tiang tidak terlihat jelas.	AB (No major defect indicated) @ 14 m

Sebagai contoh saat gelombang mencapai lapisan tanah lunak, dapat timbul pantulan seolah-olah penampang tiang berkurang. Demikian pula sebaliknya. Perlemahan sinyal gelombang pantul yang besar juga dapat terjadi saat dijumpai perubahan impedansi yang besar. Suatu retakan horizontal pada penampang tiang akan mengakibatkan sinyal yang diteruskan melalui retakan tersebut menjadi sangat kecil, dan biasanya tidak akan diperoleh pantulan dari bagian tiang yang berada di bawah retakan tersebut. Ini berarti fenomena kerusakan lain di bawah retakan tersebut tidak dapat terdeteksi. Retakan horizontal atau perubahan penampang yang besar di dekat kepala tiang akan memantulkan hampir seluruh energi gelombang tekan sedemikian sehingga pantulan dari bagian yang lebih dalam menjadi terlalu lemah untuk terdeteksi.

Perubahan impedansi secara gradual di sepanjang badan tiang umumnya tidak dapat terdeteksi karena pantulan gelombang biasanya sangat lemah. Karena gelombang tekan yang ditimbulkannya merupakan gelombang bidang yang merambat sejajar dengan penampang di sepanjang badan tiang, retakan vertikal tidak dapat terdeteksi, begitu juga dengan kemiringan tiang. Bilamana ujung tiang tertanam di dalam lapisan tanah keras yang mempunyai karakteristik hampir sama dengan bahan tiang, tidak akan diperoleh pantulan dari ujung tiang. Dengan kata lain ujung tiang tidak dapat terdeteksi. Demikian pula bila tiang terlampaui panjang sehingga energi gelombang tekan telah terdisipasi sebelum mencapai dasar tiang.

Interpretasi hasil uji tidak dapat dikatakan seratus persen akurat. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa gelombang akan terpantul hanya bila dijumpai perubahan impedansi. Sedangkan perubahan impedansi dapat terjadi karena perubahan penampang tiang, perubahan kepadatan (berat jenis) beton, atau perubahan redaman (damping) tanah, atau kombinasi beberapa dari faktor-faktor tersebut.



Gambar C-1: Hasil PIT P-10 BP-5

Proyek: FO Kopo, Bandung

Project No.: 16/ERG-PBS/PIT-10/III/2021

Gambar 4. 5 Hasil Grafik Uji PIT

Dari grafik di atas dapat terlihat bahwa terdapat pantulan gelombang setelah gelombang pertama di permukaan tiang. Pada gambar 4.6 di atas, seseorang akan menginterpretasikan bahwa sepanjang tiang tidak dijumpai perubahan penampang yang signifikan, tapi pada kedalaman 25-30 m ada pembesaran tiang yang cukup berarti atau pada kedalaman tersebut dijumpai tanah keras. Pantulan gelombang terlihat di dasar tiang memungkinkan adanya perubahan ekstrim nilai kerapatan material beton pada pondasi dengan tanah di dasar tiang, sehingga sinyal diteruskan. Dalam hal ini dapat diasumsikan bahwa kondisi tanah di dasar tiang berupa lempung pasir yang sangat keras. Disimpulkan bahwa dasar tiang kotor atau mutu beton menurun secara drastis akibat bercampur tanah.

Menurut *American Standard Testing and Material* (1979), suatu tiang dikategorikan sebagai *undamaged* apabila mempunyai nilai impedansi (BTA) sebesar 100%. Berdasarkan hasil uji PIT dan PDA diperoleh nilai BTA sebesar 7.0% pada kedalaman 20 m, dimana hal ini bisa terjadi akibat potensi adanya beton lemah (campuran beton dengan lumpur).

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan mengenai daya dukung aksial pondasi tiang *bored pile* dan keutuhan tiang *bored pile* pada Jalan Layang/ *Fly Over* Kopo Bandung dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Berdasarkan hasil perhitungan daya dukung aksial menggunakan data SPT pada kedalaman 24 m menggunakan metode Reese & Wright didapat nilai daya dukung ultimit tiang bor P-10 BP-5 diantaranya:

Metode	Analisis			
	Daya Dukung Ujung Tiang (ton)	Daya Dukung Selimut (ton)	Daya Dukung Ultimit (ton)	Daya Dukung Ultimit Kelompok Tiang (ton)
SPT	49	1 101	1 151	12 512

2. Hasil pengujian *Pile Driving Analyzer* (PDA) pada P-10 BP-5

No Tiang	Hasil Analisis CAPWAP				PDA
	Daya Dukung				Daya Dukung
	End Bearing	Friksi	Ultimit	Group	
	(ton)	(ton)	(ton)	(mm)	(ton)
P-10 BP-5	79	1 338	1 418	15 427	929

3. Hasil pengujian *Pile Integrity Test* (PIT) pada tiang P-10 BP-5 menunjukkan bahwa terlihat adanya indikasi kenaikan impedansi di kedalaman $\pm 5-14$ m (berpotensi diakibatkan oleh friksi tanah/ pembesaran tiang), lalu ujung tiang pun tidak terlihat jelas pada grafik gelombang yang tercatat. Namun dapat disimpulkan bahwa pondasi bor memiliki keutuhan (integritas) beton yang baik dan termasuk dalam klasifikasi *un-damage* dengan perincian sebagai berikut:

No Tiang	Diskusi	Klasifikasi
P-10 BP-5	Terlihat adanya indikasi kenaikan impedansi di kedalaman $\pm 5-14$ m (potensi akibat friksi tanah/ pembesaran tiang). Ujung tiang tidak terlihat jelas.	AB (No major defect indicated) @ 14 m

4. Hasil pengujian *Crosshole Sonic Logging* (CSL) pada tiang P-9 BP-14 menunjukkan bahwa integritas beton termasuk dalam klasifikasi *Good* (G). Dengan perincian sebagai berikut

- Cepat rambat gelombang terukur yang relatif baik dan seragam pada badan tiang (Good (G)/ No signal distortion and decrease in signal velocity of 10% or less are indicative of good quality concrete)
- Pada seluruh trase terjadi pengurangan kecepatan terukur di bagian bawah tiang atau sekitar 200 cm terbawah, dimana hal ini bisa terjadi akibat potensi adanya beton lemah (campuran beton dengan lumpur)

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh sampel pondasi bor memiliki keutuhan (integritas) beton yang baik.

5. Dari uraian diatas jelas bahwa uji *sonic logging* maupun uji PIT bukanlah uji kuantitatif tetapi merupakan uji kualitatif, artinya hasil uji tidak dapat secara langsung memberikan ukuran penampang, besarnya kerusakan, dan jenis kerusakan/ kelainan secara akurat.

Dalam hal memberikan kepastian terjadinya kerusakan pada kedalaman tertentu, *sonic logging* lebih baik dari PIT. Namun karena sebelumnya harus dipasang pipa uji, unsur random menjadi agak sulit diterapkan, kecuali bila jumlah tiang yang dilengkapi dengan pipa uji cukup banyak dan ini berarto membuang biaya. Uji *sonic logging* juga tidak bisa mendeteksi adanya pembesaran penampang.

Walaupun uji *sonic logging* dapat menunjukkan kedalaman pengurangan penampang (kerusakan pada penamoang tiang berupa kropos, adanya lumpur, dll), namun uji *sonic logging* tidak dapat menunjukkan adanya pembesaran penampang (*buldging*) pada tiang. Sebaliknya uji PIT mempunyai keunggulan dalam hal ini.

Dapat disimpulkan bahwa uji PIT dan *sonic logging* sangat baik dalam memeriksa keutuhan (integritas) penampang tiang, dan kedua uji tersebut dapat saling melengkapi satu sama lain.

5.2 Saran

1. Melakukan studi dengan metode lain dalam perhitungan daya dukung berdasarkan SPT untuk mengetahui metode yang paling efektif dan efisien.
2. Melakukan studi pada karakteristik tanah yang berbeda untuk mengetahui variasi setiap metode yang digunakan
3. Menambah jumlah lokasi tiang pengujian untuk mempermudah analisa hasil *Crosshole Sonic Logging* (CSL) dan mempermudah dalam perbandingan dengan hasil *Pile Integrity Test* (PIT).
4. Melakukan studi mengenai pengujian integritas tiang dengan metode yang berbeda. Mengingat studi mengenai integritas tiang pondasi masih sangat jarang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J. (1982). Analisis dan Desain Pondasi (Joseph E. Bowles). In *Analisis dan Desain Pondasi* (Vol. 1, pp. 1–464).
- DAS, BRAJA & RAMANA G.V. - 1993 - *Principles of Soil Dynamics, First Edition.pdf*. (n.d.).
- Das, B. M. (2019). Advanced Soil Mechanics. In *Advanced Soil Mechanics*.
<https://doi.org/10.1201/9781351215183>
- Interim, S. K. (n.d.). *Republik Indonesia Kementerian Pekerjaan Umum Crosshole Sonic Integrity Logging*. 27.
- Lrfd, A. (2004). *1583220064Pedoman_Pengujian_Pondasi*. 1–78.
- Paso, E. (n.d.). *Mekanika Tanah Rekayasa Geoteknis) Braja*.
- PT Yodya Karya (Pesero). (2017). *Review Desain Fly Over Kopo Provinsi Jawa Barat Jln. Soekarno Hatta, Bandung STA. 0+000-STA 1+765*. 2007.
- Siregar, C. A. (2017). *Rekayasa Fundasi I. Bandung: Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana–YPKP*.
- Siregar, C. A. (2017). *Mekanika Tanah II. Bandung: Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sangga Buana*

LAMPIRAN