

**STUDI PERILAKU DAN KERUSAKAN TIANG MENGGUNAKAN DATA
GETARAN DARI *PILE INTEGRITY TEST***

(Skripsi)

Oleh

**GOLDYNA SEPTANIA
1715011040**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

STUDI PERILAKU DAN KERUSAKAN TIANG MENGGUNAKAN DATA GETARAN DARI *PILE INTEGRITY TEST*

Oleh

GOLDYNA SEPTANIA

Fondasi merupakan salah satu struktur yang memiliki peranan penting sehingga diperlukan pemeriksaan secara berkala. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan respons tiang terhadap getaran, serta kedalaman tiang dari hasil perhitungan karena lonjakan getaran dengan data sebenarnya. Alat yang digunakan adalah *Pile Integrity Test* (PIT) yang berbasis *low strain* dengan *3-axis accelerometer*. Pada penelitian dilakukan pengujian dengan dua kondisi yaitu sebelum tiang ditimbun dan sesudah tiang ditimbun. Sampel yang digunakan pada penelitian berupa tiang dengan tinggi 1 meter sebanyak tiga buah, tiang pertama tanpa kerusakan, tiang kedua dengan satu kerusakan, dan tiang ketiga dengan dua kerusakan.

Dari hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan lonjakan getaran pada tiang kedua dan tiang ketiga di titik kerusakan pada kondisi tiang sebelum ditimbun dengan rata-rata deviasi 5,46%, sedangkan pada kondisi tiang sesudah ditimbun tidak terdeteksi adanya kerusakan. Pada 3 buah sampel ini lonjakan getaran yang menunjukkan dasar tiang rata-rata berada di kedalaman ± 900 mm dan terlihat jelas pada tiang sesudah ditimbun. Nilai rata-rata deviasi sampel sebelum dan sesudah ditimbun yang menunjukkan lonjakan getaran di dasar tiang adalah sebesar 6,98%.

Kata kunci : uji integritas tiang, regangan rendah, accelerometer 3 arah

ABSTRACT

STUDY OF BEHAVIOUR AND FOUNDATION DAMAGE USING VIBRATION DATA FROM PILE INTEGRITY TEST

By

GOLDYNA SEPTANIA

Foundation is one of the structures that had an important function that need periodic inspection. This study aimed to compare the pile response towards vibration and pile depth from the calculation due to spike of vibration and actual data. The apparatus that used is Pile Integrity Test (PIT) based on the low strain with a 3-axis accelerometer. In this study, two conditions were tested, before and after the pile was embedded in the ground. This study uses three samples with the height of pile is 1 meter, the first pile without damage, the second pile with one section damage, and the third pile with two section damage.

From the research, it was found that spike of vibration at the damage point on the second and third piles in condition of unembedded piles with an average deviation is 5.46%. On the condition of embedded pile, no damage was detected. In these 3 samples, the spike of vibration indicate pile base at average depth of ± 900 mm and clearly visible on the embedded piles. The average value of sample deviation before and after being embedded which shows a vibration spike at the base of the pile is 6.98%.

Keywords: pile integrity test, low strain, 3-axis accelerometer

**STUDI PERILAKU DAN KERUSAKAN TIANG MENGGUNAKAN DATA
GETARAN DARI *PILE INTEGRITY TEST***

Oleh

GOLDYNA SEPTANIA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi

**: STUDI PERILAKU DAN KERUSAKAN TIANG
MENGUNAKAN DATA GETARAN DARI *PILE*
*INTEGRITY TEST***

Nama Mahasiswa

: Goldyna Septania

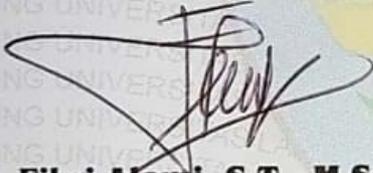
Nomor Pokok Mahasiswa : 1715011040

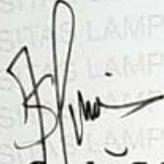
Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

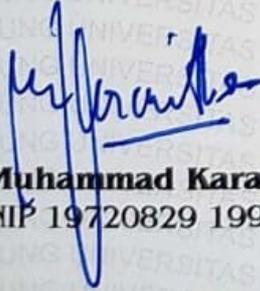
1. Komisi Pembimbing

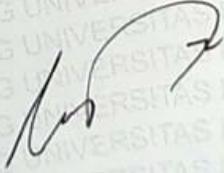

Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.
NIP 19720308 199802 1 004


Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.
NIP 19880323 201903 1 019

2. Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

3. Ketua Jurusan Teknik Sipil


Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP 19720829 199802 1 001

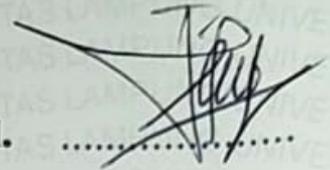

Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

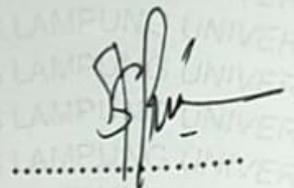
Ketua

: **Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.**



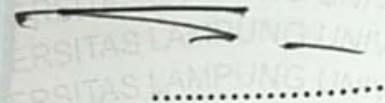
Sekretaris

: **Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng.**



Penguji Utama

: **Ir. Surya Sebayang, M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **08 November 2022**

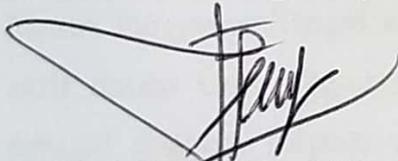
PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi saya yang berjudul "*Studi Perilaku dan Kerusakan Tiang Menggunakan Data Getaran dari Pile Integrity Test*" adalah bagian dari penelitian Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil. mengenai pemeriksaan integritas tiang fondasi dengan getaran berbasis *low strain*.
2. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
3. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah berlaku di Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 01 Desember 2022

Mengetahui,
Dosen Pembimbing Skripsi



Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc, M.Phil.
NIP 19720308 199802 1 004

Mahasiswa



Goldy Septiana
NPM. 1715011040

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung tanggal 07 September 1998, merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Edy Sutanto dan Ibu Ida. Penulis memiliki satu orang saudara yang bernama Selverico Sutanto.

Penulis menempuh Pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di Fransiskus 2 Bandar Lampung yang diselesaikan pada tahun 2005, dilanjutkan ke pendidikan tingkat dasar di SD Xaverius 2 Jambi yang diselesaikan pada tahun 2011, lalu dilanjutkan pendidikan tingkat pertama di SMP Xaverius 1 Jambi yang diselesaikan pada tahun 2014, serta dilanjutkan ke Pendidikan tingkat atas di SMA Xaverius 1 Jambi yang diselesaikan pada tahun 2017.

Pada tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswi, penulis berperan aktif dalam Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Buddha Universitas Lampung sebagai anggota Departemen Kaderisasi periode 2017/2018, sebagai anggota Departemen Kesekretariatan periode 2018/2019, serta menjadi Sekretaris Umum UKM U-Buddha Unila periode 2019/2020, dan kembali sebagai anggota Departemen Kesekretariatan periode 2020/2021. Penulis juga aktif dalam organisasi HIMATEKS (Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung), sebagai anggota Departemen Kaderisasi periode 2018/2019 dan sebagai anggota Departemen Advokasi periode 2019/2020.

Tahun 2020 Penulis mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Fajar Indah, Kecamatan Panca Jaya, Kabupaten Mesuji, Lampung selama 40 hari pada periode I, Januari-Februari 2020. Dalam pengaplikasian ilmu di bidang Teknik Sipil,

penulis juga melaksanakan Kerja Praktik di Proyek Pembangunan Kantor Kecamatan Tanjung Karang Timur yang berlokasi di Jalan M.J. Sutioso No.26, Kota Baru, Kecamatan Tanjung Karang Timur, Kota Bandar Lampung selama 3 bulan terhitung sejak tanggal 21 September 2020 sampai dengan tanggal 21 Desember 2020.

Selama masa perkuliahan di jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung, Penulis juga pernah diangkat menjadi Asisten Praktikum Mekanika Fluida dan Hidrolika periode tahun ajaran 2018/2019, serta Asisten Dosen Matakuliah Irigasi periode tahun ajaran 2020/2021 dan Matakuliah Analisis Statis Tertentu periode tahun ajaran 2020/2021. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul Studi Perilaku dan Kerusakan Tiang Menggunakan Data Getaran dari *Pile Integrity Test*.

PERSEMBAHAN

Salam damai dan sejahtera bagi kita semua, segala puji dan syukur Penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat-Nya, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga dengan terselesaikannya skripsi ini dapat menjadikanku sebagai individu yang lebih baik dan berguna bagi orang sekitar.

Skripsi ini saya persembahkan kepada :

Kedua orangtuaku yang tersayang, Bapak Edy Sutanto dan Ibu Ida serta koko Selverico Sutanto yang selalu mendoakan, memberikan kasih sayang, menjadi penyemangat disetiap kondisi baik suka maupun duka, serta memberikan segala bentuk dukungan yang tidak pernah terhenti. Mudah-mudahan skripsi ini dapat menjadi salah satu bukti tanda bakti dan terima kasihku.

Seluruh keluarga besarku, kakek, nenek, paman, bibi serta sepupu-sepupu yang selalu memberikan doa, dukungan, saran dalam proses menyelesaikan perkuliahanku.

Seluruh dosen yang telah mengajarkan banyak hal, terima kasih untuk ilmu, pengetahuan, dan pelajaran yang sudah diberikan selama di perkuliahan.

Tak lupa kepada sahabat-sahabat, Rekan Seperjuangan Teknik Sipil Angkatan 2017, yang selalu menemani dan menjalani proses perkuliahan bersama dalam suka maupun duka, memberikan semangat serta pengalaman-pengalaman yang berharga selama diperkuliahan.

Terakhir, Almamaterku Universitas Lampung , terima kasih telah memberikan kenangan indah selama perkuliahan ini.

MOTTO

“Banyak kegagalan dalam hidup ini dikarenakan orang-orang tidak menyadari betapa dekatnya mereka dengan keberhasilan saat mereka menyerah”

(Thomas Alva Edison)

“Jangan pernah menyerah karena hal yang baik dapat lahir dari kesedihan”

(Bridgett Devoue)

“Jika kamu ingin Bahagia, terikatlah pada tujuan, bukan orang atau benda”

(Albert Einstein)

SANWACANA

Salam Damai dan Sejahtera Bagi Kita Semua

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis diberikan kemudahan dan kelancaran dalam menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Studi Perilaku dan Kerusakan Tiang Menggunakan Data Getaran dari Pile Integrity Test*”. Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada program studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Muhammad Karami, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediaannya memberikan waktu untuk memberikan arahan, masukan, bimbingan dan dukungan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Ir. Aminudin Syah, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Pendamping atas kesediannya memberikan waktu untuk membimbing, memberikan saran dalam proses penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Ir. Surya Sebayang, M.T., selaku Dosen Penguji atas kesediaan waktunya untuk memberikan saran serta masukkan dalam proses penyelesaian skripsi ini.
7. Bapak Muhammad Isnaini, S.T., M.T., selaku pembimbing akademik yang telah memberikan dukungan, nasihat, dan bantuannya selama ini.

8. Seluruh bapak dan ibu dosen Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung atas ilmu pengetahuan, wawasan baik teori maupun praktek, segala bantuan dan motivasi yang telah diberikan.
9. Seluruh staf (Mba Putri, Mba Ida, Mba Suci, Mas Kemi) Fakultas Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah banyak membantu dalam proses penyelesaian skripsi khususnya terkait perihal administrasi akademik.
10. Seluruh teknisi dan karyawan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, yang telah memberikan bantuan serta bimbingannya selama penulis melakukan penelitian.
11. Kedua orangtuaku tersayang, Bapak Edy Sutanto dan Ibu Ida yang selalu berada disampingku memberikan nasehat dan dukungan baik moril dan materiil, serta senantiasa berkorban dan mengusahakan yang terbaik untukku tanpa mengenal lelah dalam membantu menyelesaikan pendidikanku. Menjadi anak dari Papa dan Mama adalah sebuah anugerah terindah yang terbesar dalam hidupku.
12. Koko tersayang, Koko Selverico Sutanto terima kasih banyak udah jadi koko yang terbaik dan selalu ada, terima kasih atas doa dan dukungan serta canda tawa yang selalu bisa menghibur dan menemaniku selama ini.
13. Rekan penelitianku, M Alhimni Rusdi yang selalu semangat dan kuat menjalani hari-hari penelitian. Terimakasih sudah membantuku dengan sabar dan ikhlas selama proses pengerjaan skripsi ini dari awal hingga akhir.
14. Rekan seperjuangan menulis skripsi, Mildariezka Salsabila Ramadhan, terimakasih mimil sudah banyak membantu dan menemani selama proses penyelesaian skripsi ini.
15. Sahabat-sahabat tersayang dan terbaik, BASING GROUP, Mildariezka S. R, Netta Riana, Evanthe Calosa, Corry Jayaputri S, Diana Williani Y. K, Millenia Yessy D, yang selalu menjadi sahabat dan tempat berbagi cerita selama perkuliahan, sangat bersyukur bisa mengenal kalian dan kalian bisa menerima kaum minoritas tanpa membedakan, semoga persahabat ini tidak hanya di perkuliahan namun sampai kapanpun.
16. Sahabat-sahabat tersayang, CAMPUR ADUK, Cincin, Veren, Desy, Anggie, Dean, Angel, terimakasih sudah menjadi sahabatku dari kecil, selalu

mendukung dan selalu bertanya mengenai kabar, tempat bercerita selama menjalani perkuliahan meski jarak memisahkan kita untuk menuntut ilmu, semoga persahabatan ini akan selalu awet sampai kapanpun.

17. Keluarga Besar Teknik Sipil Universitas Lampung angkatan 2017, yang selalu berjuang bersama dari awal hingga akhir perkuliahan ini serta berbagi kenangan, pengalaman dan membuat kesan yang tidak terlupakan, terimakasih atas semua ceritanya, sukses selalu untuk kita semua dimanapun kita berada.
18. Keluarga Besar UKM Buddha Unila, terimakasih atas cerita yang telah diberikan selama perkuliahan ini.
19. Seluruh keluarga besar HIMATEKS (Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil) Universitas Lampung yang telah memberikan dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.
20. Seluruh pihak yang telah membantu penulis tanpa pamrih yang tidak dapat disebutkan satu per satu, semoga kita sukses selalu.

Akhir kata penulis menyadari bahwa skripsi ini memiliki kekurangan sehingga masih jauh dari kata sempurna dan memerlukan kritik dan saran yang membangun agar menjadi lebih baik. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat sebagai sumber informasi maupun literatur bagi penulisan karya ilmiah selanjutnya.

Bandar Lampung, 01 Desember 2022
Penulis,

Goldyna Septania
NPM 1715011040

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian	2
1.4. Manfaat Penelitian	2
1.5. Batasan Masalah.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Fondasi	4
2.1.1. Fondasi Tiang.....	4
2.2. Karakteristik Tanah.....	5
2.3. Kuat Tekan Beton	6
2.5. Teori Dasar Rambat Gelombang.....	7
2.5.1. Klasifikasi Gelombang.....	7
2.6. Prinsip Pendeteksian Fondasi Tiang dengan Getaran	8
2.7. <i>Pile Integrity Test</i> (PIT)	10
2.7.1. Klasifikasi Kerusakan	10
2.7.2. Perangkat <i>Pile Integrity Test</i> yang Digunakan Pada Penelitian..	11
2.8. <i>Rectilinear Kinematics : Erractic Motion</i>	12
2.9. Studi Kasus Sebelumnya.....	16
III. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1. Uraian Umum.....	20
3.2. Benda Uji	20
3.3. Alat yang Digunakan.....	21
3.4. Prosedur Pengumpulan Data	24
3.4.1. Diagram Alir Penelitian	24
3.4.2. Pengambilan Sampel Tanah.....	25

3.4.3. Persiapan Permukaan Atas Tiang	25
3.4.4. Pemasangan <i>Sensor (Accelerometer)</i>	25
3.4.5. Langkah Pengumpulan Data	26
3.4.6. Analisis Bentuk Gelombang	31
3.4.7. Proses Pengolahan Data	31
3.5. Hipotesis Ilustrasi Hasil Gelombang.....	32
3.5.1. Akibat Tanah Sekitar.....	32
3.5.2. Akibat Perubahan Impedansi Tiang	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Umum.....	34
4.2. Lokasi Pengujian.....	34
4.3. Spesifikasi Tanah	35
4.4. Spesifikasi Benda Uji.....	35
4.4.1. <i>Mix Design</i>	37
4.4.2. Kuat Tekan Benda	39
4.5. Perhitungan Menggunakan <i>Graphical and Numerical Method</i>	40
4.5.1. Perhitungan Kecepatan (<i>Graphical and Numerical Method</i>)	41
4.5.2. Perhitungan Kecepatan (<i>Logger Pro</i>)	41
4.5.3. Hasil Perhitungan Jarak (<i>Graphical and Numerical Method</i>)....	42
4.6. Hasil Perhitungan dan Pembahasan (<i>Graphical and Numerical Method</i>)	43
4.7. Hasil <i>Logger Pro</i>	49
4.7.1. Sebelum Ditimbun	49
4.7.2. Sesudah Ditimbun	68
V. KESIMPULAN DAN SARAN	87
5.1. Kesimpulan	87
5.2. Saran.....	88

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A_(Hasil Perhitungan)

LAMPIRAN B_(*Mix Design*)

LAMPIRAN C_(Hasil Laboratoium Tanah)

LAMPIRAN D_(Foto Penelitian)

LAMPIRAN E (Lembar Asistensi)

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Perambatan gelombang pada tiang.....	9
2.2. Grafik hubungan percepatan terhadap waktu.	13
2.3. Pembagian grafik menjadi beberapa potongan kecil.	14
2.4. Pembuatan garis lurus pada grafik disetiap potongan.	14
3.1. Alas permukaan benda uji.....	20
3.2. Variasi benda uji.....	21
3.3. <i>Labquest 2</i>	22
3.4. <i>Sensor</i>	22
3.5. <i>Hand hammer</i>	23
3.6. <i>Power supply</i>	23
3.7. Diagram alir penelitian.	24
3.8. Menghubungkan <i>3-axis accelerometer</i> ke <i>labquest 2</i>	26
3.9. Pengukuran <i>sensor</i>	27
3.10. Tekan tombol " <i>on/off</i> ".	27
3.11. Tampilan data frekuensi arah x,y, dan z.	27
3.12. Pengaturan bagian <i>mode</i>	28
3.13. <i>Reset</i> data frekuensi menjadi 0 (nol).	28
3.14. Menekan tombol (▶).	29
3.15. Mengetuk benda uji sebelum ditimbun.	29
3.16. Mengetuk benda uji setelah ditimbun.....	30
3.17. Hasil getaran pada layar.....	30
3.18. Simpan data hasil pengujian.	31
3.19. Kurva gelombang dari tanah lunak ke tanah keras.	32
3.20. Kurva gelombang dari tanah keras ke tanah lunak.	32
3.21. Kurva gelombang tiang tanpa kerusakan.....	33
3.22. Kurva gelombang akibat reduksi impedansi.....	33
4.1. Lokasi penimbunan benda uji.	34

4.2. Pembagian sisi benda uji pada sampel 1 tanpa kerusakan.....	36
4.3. Pembagian sisi benda uji pada sampel 2 dengan satu kerusakan.	36
4.4. Pembagian sisi benda uji pada sampel 3 dengan dua kerusakan.	37
4.5. Pengujian kuat tekan beton.....	39
4.6. Hasil kecepatan <i>logger pro</i>	42
4.7. Perbandingan kedalaman tiang tanpa kerusakan.	45
4.8. Perbandingan kedalaman tiang dengan satu kerusakan.....	46
4.9. Perbandingan kedalaman tiang dengan dua kerusakan.	47
4.10. Pengambilan data sampel 2 sebelum ditimbun.....	49
4.11. Grafik <i>full</i> sampel 1 tanpa kerusakan (1).....	50
4.12. Grafik sampel 1 menyentuh tanah (1).	50
4.13. Kecepatan sampel 1 menyentuh tanah (1).	51
4.14. Hasil perhitungan jarak sampel 1 (1).....	51
4.15. Grafik <i>full</i> sampel 1 tanpa kerusakan (2).....	52
4.16. Grafik sampel 1 menyentuh tanah (2).	52
4.17. Kecepatan sampel 1 menyentuh tanah (2).	53
4.18. Hasil perhitungan jarak sampel 1 (2).....	53
4.19. Grafik <i>full</i> sampel 1 tanpa kerusakan (3).....	54
4.20. Grafik sampel 1 menyentuh tanah (3).	54
4.21. Kecepatan sampel 1 menyentuh tanah (3).	55
4.22. Hasil perhitungan jarak sampel 1 (3).....	55
4.23. Grafik <i>full</i> sampel 2 satu kerusakan (1).....	56
4.24. Grafik sampel 2 pada bagian (1).....	56
4.25. Kecepatan sampel 2 pada bagian (1).	57
4.26. Hasil perhitungan jarak sampel 2 (1).....	57
4.27. Grafik <i>full</i> sampel 2 satu kerusakan (2).....	58
4.28. Grafik sampel 2 menyentuh tanah (2).	58
4.29. Kecepatan sampel 2 menyentuh tanah (2).	59
4.30. Hasil perhitungan jarak sampel 2 (2).....	59
4.31. Grafik <i>full</i> sampel 2 satu kerusakan (3).....	60
4.32. Grafik sampel 3 menyentuh tanah (3).	60
4.33. Kecepatan sampel 3 menyentuh tanah (3).	61

4.34. Hasil perhitungan jarak sampel 2 (3).....	61
4.35. Grafik <i>full</i> sampel 3 dua kerusakan (1).....	62
4.36. Grafik sampel 3 pada bagian (1).....	62
4.37. Kecepatan sampel 3 pada bagian (1).	63
4.38. Hasil perhitungan jarak sampel 3 (1).....	63
4.39. Grafik <i>full</i> sampel 3 dua kerusakan (2).....	64
4.40. Grafik sampel 3 menyentuh tanah (2).	64
4.41. Kecepatan sampel 3 menyentuh tanah (2).	65
4.42. Hasil perhitungan jarak sampel 3 (2).....	65
4.43. Grafik <i>full</i> sampel 3 dua kerusakan (3).....	66
4.44. Grafik sampel 3 pada bagian (3).....	66
4.45. Kecepatan sampel (3) pada bagian (3).....	67
4.46. Hasil perhitungan jarak sampel 3 (3).....	67
4.47. Pengambilan data sampel 2 setelah ditimbun.....	68
4.48. Grafik <i>full</i> sampel 1 timbunan bagian (1).....	69
4.49. Grafik sampel 1 timbunan bagian (1).	69
4.50. Kecepatan sampel 1 timbunan bagian (1).....	70
4.51. Hasil jarak sampel 1 timbunan bagian (1).	70
4.52. Grafik <i>full</i> sampel 1 timbunan bagian (2).....	71
4.53. Grafik sampel 1 timbunan bagian (2).	71
4.54. Kecepatan sampel 1 timbunan bagian (2).....	72
4.55. Hasil jarak sampel 1 timbunan bagian (2).	72
4.56. Grafik <i>full</i> sampel 1 timbunan bagian (3).....	73
4.57. Grafik sampel 1 timbunan bagian (3).	73
4.58. Kecepatan sampel 1 timbunan bagian (3).....	74
4.59. Hasil jarak sampel 1 timbunan bagian (3).	74
4.60. Grafik <i>full</i> sampel 2 timbunan bagian (1).....	75
4.61. Grafik sampel 2 timbunan bagian (1).	75
4.62. Kecepatan sampel 2 timbunan bagian (1).....	76
4.63. Hasil jarak sampel 2 timbunan bagian (1).	76
4.64. Grafik <i>full</i> sampel 2 timbunan bagian (2).....	77
4.65. Grafik sampel 2 timbunan bagian (2).	77

4.66. Kecepatan sampel 2 timbunan bagian (2).....	78
4.67. Hasil jarak sampel 2 timbunan bagian (2).....	78
4.68. Grafik <i>full</i> sampel 2 timbunan bagian (3).....	79
4.69. Grafik sampel 2 timbunan bagian (3).....	79
4.70. Kecepatan sampel 2 timbunan bagian (3).....	80
4.71. Hasil jarak sampel 2 timbunan bagian (3).....	80
4.72. Grafik <i>full</i> sampel 3 timbunan bagian (1).....	81
4.73. Grafik sampel 3 timbunan bagian (1).....	81
4.74. Kecepatan sampel 3 timbunan bagian (1).....	82
4.75. Hasil jarak sampel 3 timbunan bagian (1).....	82
4.76. Grafik <i>full</i> sampel 3 timbunan bagian (2).....	83
4.77. Grafik sampel 3 timbunan bagian (2).....	83
4.78. Kecepatan sampel 3 timbunan bagian (2).....	84
4.79. Hasil jarak sampel 3 timbunan bagian (2).....	84
4.80. Grafik <i>full</i> sampel 3 timbunan bagian (3).....	85
4.81. Grafik sampel 3 timbunan bagian (3).....	85
4.82. Kecepatan sampel 3 timbunan bagian (3).....	86
4.83. Hasil jarak sampel 3 timbunan bagian (3).....	86

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Kategori Hasil Pengujian Tiang.....	11
4.1. Perhitungan <i>Mix Design</i> dengan Metode DoE (<i>Design of Experiment</i>)	38
4.2. Nilai Perbandingan Material	39
4.3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton.....	40
4.4. Hasil Pengujian Sebelum Ditimbun.....	43
4.5. Hasil Pengujian Setelah Ditimbun	44
4.6. Perbandingan Hasil Jarak Sebelum dan Sesudah Ditimbun	44

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Bangunan yang kokoh harus memiliki struktur yang kokoh pula. Struktur utama bangunan terdiri dari fondasi, kolom, balok dan pelat. Struktur-struktur tersebut memiliki fungsi masing-masing yang saling berkaitan, fondasi merupakan struktur bangunan bawah yang berhubungan langsung dengan tanah. Fondasi memiliki fungsi untuk menyalurkan beban dari struktur di atasnya ke tanah atau batuan di bawahnya. (Setiawan, 2016)

Fondasi merupakan salah satu pekerjaan struktur yang sangat penting sehingga diperlukan perencanaan yang baik dan teliti, agar dapat bekerja sesuai fungsinya. Hal ini karena terdapat banyak kasus kegagalan bangunan yang diakibatkan oleh kegagalan fondasi. Kegagalan fondasi tersebut dapat menyebabkan bangunan tidak dapat berfungsi dengan baik atau diperlukan biaya yang besar untuk memperbaikinya. Kegagalan dapat disebabkan karena pelaksanaan pekerjaan yang kurang baik, desain yang tidak benar dan lain-lain.

Salah satu pengujian yang umum dilakukan untuk mengetahui bahwa fondasi yang di pasang baik dan sesuai perencanaan, dapat dilakukan dengan pengujian PDA (*Pile Driving Analysis*) dan juga dengan PIT (*Pile Integrity Test*). Kedua pengujian tersebut mempunyai sasaran yang berbeda. PDA secara umum untuk mengetahui kapasitas dan daya dukung tiang pancang, sedangkan PIT untuk mengetahui integritas material tiang pancang dan kerusakan yang terjadi di dalam tiang.

Dalam studi ini salah satu tujuannya untuk mengetahui integritas tiang dan juga kerusakan tiang melalui pengujian PIT. Dengan menggunakan data

getaran yang diperoleh dengan cara memukul tiang menggunakan *hand hammer* dan mencatat rambatan gelombang sepanjang tiang, maka integritas dan kerusakan tiang dapat diperkirakan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah mengenai pentingnya untuk mengetahui integritas tiang dan kerusakan tiang pada suatu struktur bangunan. Adapun rumusan masalah yang dapat diambil adalah “Apakah PIT test dapat mengevaluasi perilaku tiang dan kerusakan yang ada, saat kondisi tiang belum ditimbun maupun setelah ditimbun secara detail?”

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menganalisa dan membandingkan perilaku tiang terhadap respon getaran, pada kondisi sebelum ditimbun maupun sesudah ditimbun, dengan posisi letak kerusakan yang berbeda dan telah ditentukan pada masing-masing tiang yang diuji.
2. Untuk mengevaluasi dan membandingkan kedalaman tiang dari hasil perhitungan karena lonjakan getaran dengan data sebenarnya, pada saat kondisi tiang sebelum ditimbun maupun sesudah ditimbun.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang diharapkan dari penelitian ini yaitu :

1. Untuk mengetahui perilaku tiang pada kondisi sebelum ditimbun dan sesudah ditimbun, dengan posisi kerusakan yang berbeda di setiap tiang yang diuji berdasarkan hasil analisa dan perbandingan.
2. Mengevaluasi dan membandingkan kedalaman tiang karena lonjakan getaran dengan data sebenarnya.

3. Untuk memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu khususnya pada bidang struktur dalam menguji tingkat kelayakan fondasi yang sudah ada dengan menggunakan rambatan dan pantulan getaran.

1.5. Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Benda uji dibuat dengan beberapa variasi yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu :
 - a. Murni tanpa tulangan dan tidak ada cacat.
 - b. Murni tanpa tulangan dengan cacat pada satu sisi.
 - c. Murni tanpa tulangan dengan cacat pada kedua sisi.
2. Beton yang digunakan adalah beton dengan mutu standar yaitu 25 MPa.
3. Panjang tiang dibatasi hanya 1 meter.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Fondasi

Fondasi adalah salah satu struktur bangunan yang terletak paling bawah. Fondasi memiliki fungsi untuk meneruskan beban dari bangunan di atasnya ke tanah ataupun batuan yang berada di bawahnya. Fondasi diklasifikasikan menjadi 2 yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. (Hardiyatmo, 2011)

2.1.1. Fondasi Tiang

Fondasi tiang merupakan salah satu jenis fondasi dalam, hal ini dikarenakan lapisan tanah kuat yang terletak sangat dalam. Pada umumnya fondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan yang menahan gaya ke atas. Fondasi tiang sering digunakan pada bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya penggulingan akibat beban angin, serta sering digunakan pada bangunan dermaga. (Hardiyatmo, 2008)

Fondasi tiang sendiri terbagi menjadi beberapa jenis, seperti tiang kayu, tiang beton pracetak, tiang beton cetak di tempat, tiang bor, tiang baja profil, maupun tiang komposit. Salah satu jenis yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah tiang pancang pracetak, di mana tiang dicetak terlebih dahulu kemudian diangkut ke lokasi yang sudah ditentukan. Keuntungan dalam pemakaian tiang pancang pracetak menurut Hardiyatmo (2008), adalah :

1. Material yang digunakan untuk pembuatan tiang dapat diperiksa terlebih dahulu sebelum pemancangan.
2. Pada pelaksanaannya tidak dipengaruhi oleh air tanah.

3. Tiang yang sudah dicetak dapat dipancang sampai kedalaman yang dalam.
4. Dengan pemancangan tiang tersebut dapat menambah kepadatan tanah granuler dibawahnya.

Terdapat keuntungan tentunya terdapat kerugian dari penggunaan tiang pancang pracetak, menurut Hardiyatmo (2008), kerugian tersebut antara lain :

1. Masalah yang terjadi dari pengembangan permukaan tanah dan gangguan tanah lainnya akibat dari pemancangan.
2. Pemancangan yang dilakukan terkadang membuat tiang rusak.
3. Diameter tiang yang besar akan sulit untuk dipancang.
4. Pemancangan yang dilakukan akan menimbulkan gangguan suara, getaran dan deformasi tanah sehingga menimbulkan kerusakan bangunan yang ada disekitarnya.
5. Penulangan yang dipasang dipengaruhi oleh tegangan yang terjadi ketika pangangkutan dan pemancangan tiang.

2.2. Karakteristik Tanah

Tanah secara umum dibedakan menjadi 2 (dua) tanah berpasir dan tanah lempung murni, kedua jenis tanah tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Tanah berpasir (kohesi $c = 0$) hal ini karena pasir memiliki gradasi tertentu sehingga butir-butir pasir akan saling bergesekan dan menghasilkan sudut gesek dalam. Tanah lempung (sudut gesek dalam $\phi = 0$) karena butiran tanah lempung sangat halus sehingga tanah lempung memiliki nilai kohesi. Nilai kohesi merupakan nilai interaksi antara mineral penyusun tanah dengan air yang mengakibatkan terjadi lekatan antara butir satu dengan butir lain. (Pujiyanto, 2005)

Pada penelitian Pujiyanto (2009), beliau mengutip dari penelitian Mahmud dkk (2004) pasir memiliki karakteristik lainnya, di mana pasir telah lama dikenal sebagai peredam getaran mesin. Pada penelitiannya dengan menggunakan

model di laboratorium untuk pasir dengan 1 (satu) lapis mampu meredam antara 2,1% sampai dengan 8%, selain itu apabila pasir mencapai kepadatan maksimum tekanan akan semakin besar sehingga semakin besar juga rasio redamannya.

Mustaqim (2016), pada penelitiannya menganalisis karakteristik getaran dengan tanah sebagai medianya, didapatkan hasil tanah lempung memiliki struktur tanah yang padat dan keras sehingga getaran yang terjadi akan lebih besar dibandingkan tanah merah dan tanah berbatu. Oleh karena itu, lempung memiliki tingkat redaman yang kecil.

2.3. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan kemampuan dari beton itu sendiri untuk menahan gaya tekan yang diberikan oleh mesin penekan, dengan beban yang diberikan per satuan luas hingga membuat beton tersebut hancur (SNI 03-1974-1990). Pada penelitian ini digunakan 3 (tiga) benda uji berbentuk kubus dengan dimensi $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ sebagai sampel untuk mengetahui kuat tekan tiang. Kuat tekan beton dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.1.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan :

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban tekan (N)

A = Luas permukaan benda uji (mm^2)

2.4. *Mix Design*

Mix design merupakan perancangan campuran beton agar menghasilkan kuat tekan yang direncanakan. Dengan menggunakan metode yang telah ditetapkan maka akan didapatkan kebutuhan beton untuk 1 m^3 . Pada

penelitian ini, perancangan campuran beton menggunakan metode *DoE* (*Design of Experiment*) dan kuat tekan yang direncanakan adalah mutu beton normal 25 MPa.

2.5. Teori Dasar Rambat Gelombang

Gelombang adalah suatu perambatan energi dari satu tempat ke tempat lainnya tanpa menyeret media yang dilewatinya (Surya, 2009). Gelombang merambat menurut waktu dan tempat. Gelombang akan terus menerus terjadi jika sumber getaran terus bergetar.

2.5.1. Klasifikasi Gelombang

Gelombang dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, jika ditinjau dari arah rambat gelombang dan arah gerakan partikel maka gelombang dapat dibagi menjadi (Surya, 2009) :

1. Gelombang transversal, merupakan gelombang dengan memiliki arah gerakan partikel yang dilewatinya tegak lurus dari arah rambatannya.
2. Gelombang longitudinal, merupakan gelombang dengan arah gerakan partikel yang dilewatinya sejajar dengan arah rambatannya.

Gelombang juga dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme dan cepat rambatnya, menurut Surya (2009) gelombang dapat dibedakan menjadi :

1. Gelombang mekanik, adalah gelombang yang membutuhkan media dalam perambatannya baik zat padat, zat cair atau gas.
2. Gelombang elektromagnetik, merupakan gelombang yang tidak membutuhkan media untuk perambatannya seperti gelombang cahaya, gelombang radio, dan gelombang mikro.

2.6. Prinsip Pendeteksian Fondasi Tiang dengan Getaran

Pile integrity test (PIT) merupakan pengujian berbasis *low strain* dengan hasil yang didapat berupa data kecepatan atau gaya. Data tersebut didapat dari pemberian *impact* yang diterapkan secara aksial ke tiang biasanya pada kepala tiang. Data tersebut dianalisis untuk membantu dalam mengevaluasi integritas tiang dan dimensi fisik tiang seperti luas penampang, panjang tiang serta konsistensi material tiang. Metode PIT tidak dapat memberikan informasi mengenai penyebab kerusakan dan daya dukung tiang. Pengujian PIT tidak dapat mengidentifikasi semua ketidaksempurnaan, namun dapat menjadi alat yang berguna dalam mengidentifikasi cacat utama dalam jangka waktu efektif. (ASTM D5882-96)

Tumbukan (*impact*) yang diberikan pada permukaan atas tiang dengan menggunakan *hand hammer* akan menghasilkan sebuah gelombang tegangan sesaat, sehingga mengakibatkan terjadinya gerakan partikel pada permukaan tiang tersebut. Gelombang tegangan yang terjadi akan disalurkan hingga ke bagian bawah tiang, yang kemudian gelombang akan dipantulkan kembali ke kepala tiang. Pengembalian gelombang tersebut disesuaikan dengan perubahan impedansi dalam tiang. Perubahan impedansi ini dapat terjadi karena adanya perubahan pada penampang tiang, kepadatan beton maupun sifat dari tanah. (Hertlein & Davis, 2006)

Tegangan yang terjadi dikarenakan adanya tekanan yang diberikan berupa gaya *force* (F), sehingga menimbulkan gerakan pada permukaan atas tiang yang menyebabkan terjadinya kecepatan (c) yang bergerak di sepanjang badan tiang. Kecepatan merupakan dasar penilaian penting yang dihitung menggunakan Persamaan 2.2 di bawah ini :

$$c = \frac{2.L}{\Delta t} \dots\dots\dots(2.2)$$

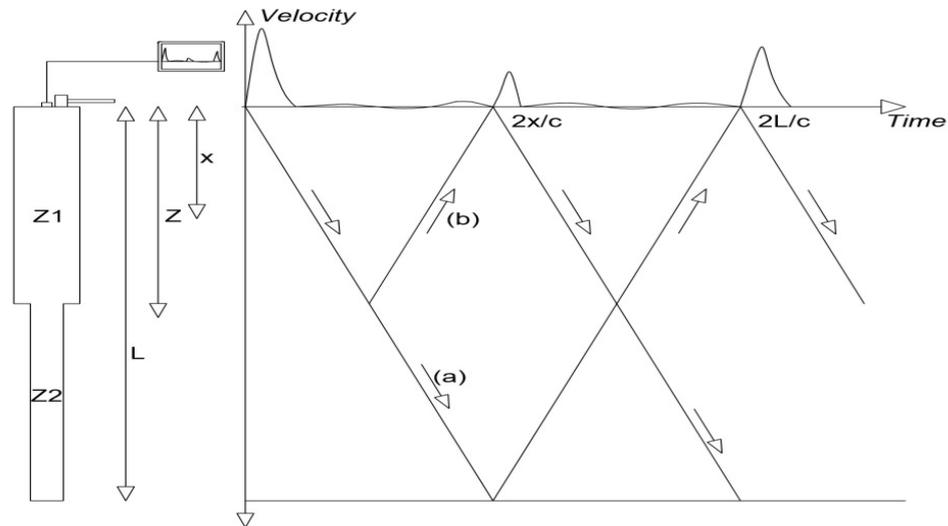
Di mana :

c : Kecepatan rambat gelombang (m/s)

L : Panjang tiang sebenarnya (m)

Δt : Selisih waktu antara gelombang pukulan pertama dengan dasar tiang (s)

Kecepatan yang terjadi akan menghasilkan sebuah data gelombang yang diinterpretasikan sebagai suatu fungsi waktu. Dari data gelombang tersebut dapat dianalisa di setiap perubahan yang terjadi pada tiang. Pemantulan gelombang juga dapat disebabkan oleh efek dari sifat tanah yang berubah, di mana efek tersebut akan memberikan pengaruh yang berlawanan terhadap efek reduksi penampang tiang. (Kartika, 2010)



Gambar 2.1. Perambatan gelombang pada tiang.

Gambar di atas mengilustrasikan perjalanan gelombang akibat adanya *impact* yang diberikan pada permukaan tiang menggunakan *hand hammer*. Pada (a) menggambarkan pemantulan gelombang akibat terkena ujung dasar tiang, sedangkan pada (b) menggambarkan dampak pemantulan gelombang akibat terkena reduksi penampang pada tiang. Gelombang yang kembali ke kepala tiang karena terkena dasar tiang atau karena adanya reduksi penampang dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.3.

$$x = \frac{1}{2} \cdot \Delta t \cdot c \dots\dots\dots(2.3)$$

Di mana :

c : Kecepatan rambat gelombang (m/s)

Δt : Selisih waktu antara gelombang pukulan pertama dengan kerusakan (s)

x : Jarak dari kepala tiang sampai kedalaman akibat reduksi penampang (m)

2.7. *Pile Integrity Test* (PIT)

Pile Integrity Test (PIT) merupakan salah satu metode yang bersifat *non-destructive test* (NDT), karena PIT termasuk dalam *Low Strain Integrity Testing of Piles* (ASTM D5882-96) yang berarti pengujian menggunakan regangan rendah. Pengujian PIT hanya menggunakan *hand hammer* dengan ukuran kecil yang berfungsi dalam memberikan *impact* untuk menghasilkan gelombang. Metode *low strain* yang digunakan dalam PIT memberikan keuntungan karena pengujian tiang dapat dilakukan langsung di lokasi konstruksi dan dapat diidentifikasi secara langsung.

PIT memiliki fungsi untuk menguji kualitas dan integritas dari tiang fondasi dalam keadaan tiang yang sudah terpancang di dalam tanah. Oleh karena itu *sensor* PIT harus memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi, menurut ASTM D5882-96 respon frekuensi pada *sensor* harus mencapai lebih dari 5.000 Hz. Menurut Anggunadi & Sutarina (2017), respon frekuensi ialah rentang di mana *sensor accelerometer* masih dapat mendeteksi gerakan dengan akurat.

2.7.1. Klasifikasi Kerusakan

Kerusakan fondasi yang terjadi dapat dilihat dari adanya perubahan impedansi di dalam tiang. Perubahan impedansi tersebut dapat dikarenakan adanya perubahan pada tiang, kepadatan beton itu sendiri, atau karena sifat tanah (Hertlein & Davis, 2006). Di mana kerusakan tiang dapat diklasifikasikan berdasarkan persentase seperti pada Tabel 2.1:

Tabel 2.1. Kategori Hasil Pengujian Tiang

Kategori	Penjelasan
100 % (<i>Undamaged</i>)	Tidak ada kerusakan pada tiang uji.
99 – 80 % (<i>Slight Damage</i>)	Terdapat kerusakan ringan namun tidak mengurangi daya dukung aksial.
79 – 60 % (<i>Damage</i>)	Terdapat kerusakan pada tiang sehingga diperlukan perbaikan atau pertimbangan jika ingin digunakan kembali.
< 60 % (<i>Broken</i>)	Tiang rusak dan tidak direkomendasikan untuk digunakan.

2.7.2. Perangkat *Pile Integrity Test* yang Digunakan Pada Penelitian

Pada penelitian ini komponen perangkat yang digunakan dalam pengujian *Pile Integrity Test* (PIT) terdiri dari :

1. *Labquest 2*

Labquest 2 adalah *monitor* dengan menggunakan sistem layar sentuh dan berfungsi untuk merekam dan memproses sinyal getaran yang masuk. Hasil sinyal tersebut akan langsung disimpan dan dapat dilihat langsung pada layar. *Labquest 2* mudah dioperasikan serta mudah untuk dibawa kemana-mana.

2. *3-Axis Accelerometer*

3-axis accelerometer adalah alat yang langsung terhubung dengan *labquest 2* dan tiang yang akan diteliti. *3-axis accelerometer* merupakan alat *transducer* yang berfungsi untuk mengukur percepatan gaya dengan mengirimkan sinyal. Percepatan gaya yang terjadi dapat dibagi menjadi percepatan gaya statis maupun dinamis. Di mana percepatan gaya statis seperti gaya konstan dari gravitasi, dan untuk percepatan gaya dinamis disebabkan karena

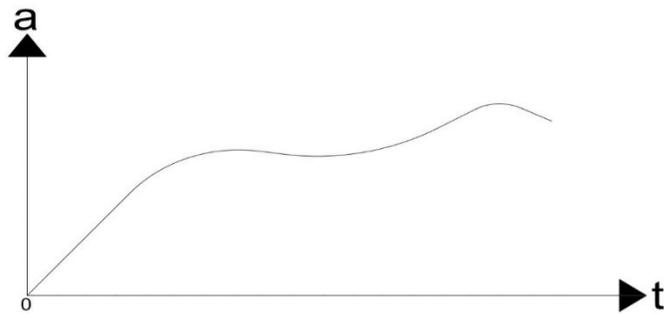
adanya gerakan atau getaran yang berasal dari *accelerometer*. (Kartika, 2010)

3. *Hand hammer*

Hand hammer merupakan sebuah palu tangan kecil, berfungsi untuk memberikan *impact* pada permukaan atas tiang yang akan menghasilkan suatu gelombang dengan regangan tingkat rendah yang menyebar di seluruh tiang. Saat *hand hammer* memberikan *impact*, maka *hand hammer* dan tiang yang sedang diteliti akan saling berhubungan. Di mana gaya yang ditimbulkan akan berbanding lurus dengan percepatan dan menghasilkan suatu gelombang. Hasil dari gelombang tersebut dapat memperlihatkan impedansi tiang (Z). (Kartika, 2010)

2.8. *Rectilinear Kinematics : Erractic Motion*

Engineering Mechanics : Dynamics Twelfth Edition merupakan sebuah judul buku karya R.C. Hibbeler tahun 2010. Dalam buku tersebut berisi konsep penyelesaian untuk getaran dengan gerakan yang tidak beraturan, yang menghasilkan nilai variabel kecepatan, percepatan, serta posisi menjadi tidak konstan. Untuk memudahkan pengerjaan apabila diketahui dua variabel di antara jarak (X), kecepatan (V), percepatan (a) dan waktu (t), maka bisa dipresentasikan dengan membuat hubungan grafik, untuk memudahkan dalam mencari variabel lainnya karena setiap variabel saling berhubungan yang dihubungkan oleh fungsi diferensial.



Gambar 2.2. Grafik hubungan percepatan terhadap waktu.

Jika terdapat grafik hubungan antara percepatan dan waktu seperti gambar di atas maka nilai kecepatan dapat dicari dengan menggunakan persamaan diferensial yang dapat dilihat pada Persamaan 2.4.

$$\Delta V = \int a \, dt \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

ΔV : Perubahan kecepatan (m/s)

a : Percepatan (m/s^2)

dt : Diferensial terhadap waktu (s)

Konsep yang sama juga dapat digunakan untuk mengetahui posisi atau jarak akibat adanya perubahan lonjakan getaran yang terjadi. Jarak dapat dihitung apabila nilai kecepatan sudah didapatkan karena jarak didapat dari integral kecepatan terhadap waktu yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

$$\Delta X = \int V \, dt \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

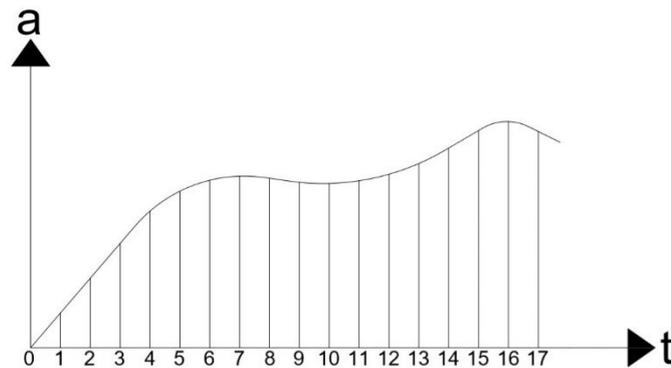
ΔX : Perubahan jarak (m)

V : Kecepatan (m/s)

dt : Diferensial terhadap waktu (s)

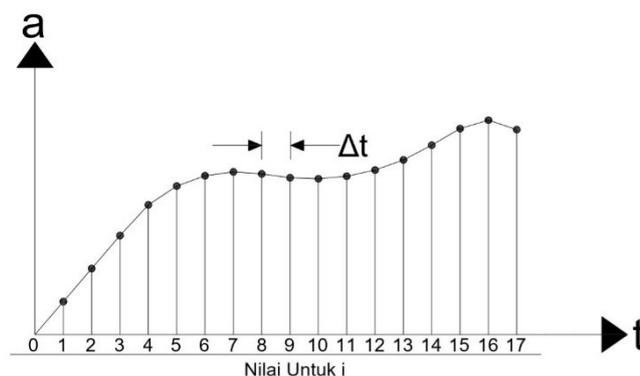
Pada penelitian yang akan dilakukan hasil yang akan ditampilkan berupa grafik hubungan antara percepatan dan waktu. Dalam mencapai tujuan akhir penelitian, dibutuhkan hasil kecepatan untuk menentukan posisi kedalaman

akibat adanya lonjakan getaran. Dengan menggunakan konsep di atas maka penyelesaian dapat dilakukan menggunakan metode *graphical and numerical method*. Untuk menghasilkan nilai kecepatan yang mendekati maka grafik yang didapatkan dibagi menjadi bagian-bagian kecil.



Gambar 2.3. Pembagian grafik menjadi beberapa potongan kecil.

Grafik yang telah dibagi menjadi potongan kecil tersebut kemudian dihubungkan dengan garis lurus disetiap titik potongannya, hal ini bertujuan untuk mendapatkan nilai percepatan yang konstan. Integral dari percepatan akan menghasilkan kecepatan. Kecepatan akan didapat dari integral luas pada setiap bagian potongan pada grafik. Nilai kecepatan yang didapat hanya berlaku pada daerah potongan tersebut, maka semakin kecil potongan pada grafik akan semakin tinggi akurasi nilai kecepatan yang didapat.



Gambar 2.4. Pembuatan garis lurus pada grafik disetiap potongan.

Pada metode ini nilai percepatan harus diasumsikan memiliki nilai konstan, yang dapat diketahui dengan rumus pendekatan mencari nilai rata-rata disetiap perubahan waktu sebelum dan sesudah pada bagian yang akan dihitung.

$$a_{av,i} = \frac{a_{i-1} + a_i}{2} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

$a_{av,i}$: Percepatan rata-rata ke i (m/s²)

a_{i-1} : Pecepatan sebelum ke i (m/s²)

a_i : Pecepatan sesudah ke i (m/s²)

Setelah didapatkan nilai rata-rata percepatan, maka nilai kecepatan dapat dihitung dengan asumsi nilai percepatan konstan.

$$\Delta V_i = a_{av,i} \times \Delta t \dots\dots\dots(2.7)$$

Dari Persamaan 2.7 nilai ΔV_i dan $a_{av,i}$ dapat disubstitusi, sehingga didapatkan rumus pendekatan untuk mencari nilai kecepatan akhir dan persamaan *numerical integration method* yang dapat dilihat di bawah ini :

$$\Delta V_i = \left(\frac{a_{i-1} + a_i}{2} \right) \times \Delta t \dots\dots\dots(2.8)$$

$$V_i = V_{i-1} + \left(\frac{a_{i-1} + a_i}{2} \right) \times \Delta t \dots\dots\dots(2.9)$$

$$V = V(0) + \int a \, dt \dots\dots\dots(2.10)$$

Keterangan :

$a_{av,i}$ = Percepatan rata-rata (m/s²)

a_{i-1} = Percepatan sebelum (m/s²)

a_i = Pecepatan sesudah (m/s²)

ΔV_i = Perubahan kecepatan (m/s)

V_{i-1} = Kecepatan sebelum (m/s)

- V_i = Kecepatan sesudah/akhir (m/s)
 V_0 = Kecepatan awal
 Δt = Perubahan waktu (s)

Setelah didapatkan nilai kecepatan, dengan menggunakan metode yang sama maka jarak dapat diketahui. Jarak yang dihitung digunakan untuk melihat letak posisi kerusakan yang terjadi pada tiang akibat adanya lonjakan getaran yang terekam, untuk lebih jelas lonjakan getaran dapat dilihat pada *software logger pro*. Adapun perhitungan jarak dapat dilihat pada Persamaan 2.11, untuk pendekatan menggunakan *numerical integration method* dapat dilihat pada Persamaan 2.12 di bawah ini :

$$X_i = X_{i-1} + \left(\frac{V_{i-1} + V_i}{2} \right) \Delta t \dots\dots\dots(2.11)$$

$$X = X(0) + \int v \, dt \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

- X_{i-1} = Jarak sebelum (m)
 X_i = Jarak sesudah/akhir (m)
 X_0 = Jarak awal

Pada pengujian ini diasumsikan bahwa kecepatan awal (V_0) dan jarak awal (X_0) sama dengan 0 (nol).

2.9. Studi Kasus Sebelumnya

Likins & Rausche (2000), melakukan riset mengenai kemajuan teknologi baru yaitu melakukan pengujian integritas tiang dengan regangan rendah. Pada penelitian tersebut dinyatakan hindari pengujian pada tiang beton yang terkontaminasi serta pastikan tiang beton yang akan diuji memiliki catatan yang lengkap. Hal ini berguna untuk menentukan ukuran *hand hammer* yang akan digunakan serta untuk menentukan lokasi pemberian tumbukan pada

tiang. Tiang akan diklasifikasikan menjadi 4 (empat) kategori menurut kerusakannya sehingga tindakan yang perlu diambil juga akan berbeda-beda adapun 4 kategori tersebut yaitu :

- Kategori A, yaitu respon getaran pada dasar tiang terlihat jelas, dan tidak ada kerusakan yang terlihat, karena apabila kerusakan penampang yang terjadi kurang dari 20%, kerusakan tersebut tidak dapat dengan mudah terdeteksi.
- Kategori B, yaitu terdapat kerusakan yang terlihat serius dan respon getaran pada dasar tiang tidak terlihat.
- Kategori C, terdapat kemungkinan tiang rusak, meskipun respon getaran pada dasar tiang terlihat.
- Kategori D, data yang terlihat tidak meyakinkan di mana bentuk getaran tidak beraturan sehingga menghasilkan catatan yang kompleks.

Kartika (2010), dalam skripsinya menyatakan bahwa respon sinyal pada dasar tiang terlihat jelas apabila tiang masih dalam keadaan utuh dan tidak mengalami kerusakan akibat proses pemancangan. Namun apabila terdapat perubahan impedansi, atau cacat pada tiang serta terdapat sambungan dengan kualitas yang tidak baik maka akan menghasilkan rekaman data yang kompleks, sehingga respon sinyal setelah pemantulan gelombang pertama atau kedua akan sulit untuk dianalisa.

Hingorani (2019), pada penelitiannya mengenai interpretasi hasil uji integritas tiang regangan rendah, menyatakan bahwa metode pengujian dengan menggunakan regangan rendah termasuk pengujian *non-destructive test* (NDT). Pengujian ini menawarkan beberapa keunggulan karena penerapannya yang cepat serta tidak memakan biaya. Dengan menggunakan regangan rendah kemungkinan kerusakan karena adanya rongga, patah pada tiang, perubahan impedansi dan perkiraan panjang tiang dapat diketahui. Namun dalam proses analisis dan interpretasi harus dilakukan dengan sangat hati-hati, agar dapat menentukan tindakan yang harus dilakukan sesuai dengan tingkat kerusakan pada tiang.

Afriantoro & Kawanda (2019), juga melakukan interpretasi hasil uji *pile integrity test* pada fondasi tiang bor. Dari interpretasi tersebut ditarik kesimpulan bahwa PIT dapat mendeteksi kedalaman tiang. PIT hanya dapat mendeteksi satu jenis kerusakan jika ditemukan kerusakan lain pada tiang yang sama, namun berbeda kedalaman maka PIT tidak dapat mendeteksi kerusakan tersebut. PIT juga tidak dapat mendeteksi *minor damage*, kerusakan dengan posisi vertikal, kapasitas tiang serta penyebab kerusakan.

Li Hua Wei (2021), melakukan penelitian mengenai pendeteksian integritas tiang dengan regangan rendah dan simulasi *numerical*. Dalam penelitiannya dikatakan jika ingin meneliti integritas tiang diperlukan pertimbangan mengenai pengaruh tanah di sekitar tiang seperti unsur material, plastisitas dan viskositas tanahnya. Pada penelitian ini juga mengatakan bahwa tiang pendek akan mempengaruhi bentuk gelombang sehingga sulit untuk melakukan penilaian terhadap integritas tiang.

Gouw Tjie-Long (2011), alat uji PIT terdiri dari *hand hammer* berbahan khusus, serta *accelerometer* dengan akurasi tinggi yang disambungkan dengan sebuah *monitor* yang dilengkapi dengan penguat sinyal. Menurut ASTM D5882-96 *accelerometer* yang digunakan harus memiliki respon frekuensi di atas 5.000 Hz. Dengan tingkat akurasi *accelerometer* yang tinggi maka kerusakan atau perubahan pada penampang tiang dapat terdeteksi. Terdeteksinya kerusakan atau perubahan penampang tiang karena adanya pantulan gelombang ke kepala tiang. Perubahan penampang tiang ini disebut juga impedansi tiang, semakin besar impedansi tiang maka semakin besar juga kerusakan atau perubahan yang terjadi pada tiang. Adapun parameter impedansi ini adalah kumpulan dari karakteristik tiang dan tanah. Perubahan impedansi yang paling terlihat berada pada dasar tiang, dikarenakan adanya perbedaan karakteristik antara material beton dengan tanah di dasar tiang.

Pada penelitian yang sama rambatan gelombang juga dibatasi oleh material tiang serta tanah disekelilingnya, jika kedua media tersebut memiliki nilai karakteristik yang sama, gelombang yang terdeteksi akan terpancar ke segala

arah dan tidak menimbulkan rambatan gelombang yang berarti. Namun, material tiang dan tanah memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga gelombang tekan akan merambat di sepanjang badan tiang menuju dasar tiang. Selain itu, apabila tidak terjadi pantulan gelombang pada saat pengujian, hal ini bisa disebabkan oleh adanya redaman tanah yang terlalu besar atau dikarenakan tiang yang terlalu dalam. Pengujian PIT sebaiknya dilakukan secara acak dalam jumlah yang memadai, hasil pengujian digunakan sebagai indikasi awal adanya kerusakan pada fondasi tiang. Jika didapatkan keraguan pada hasil pengujian maka lakukan pengujian lebih lanjut terhadap tiang.

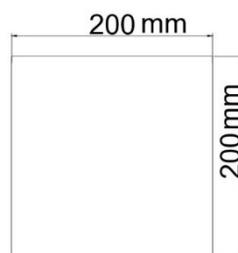
III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Uraian Umum

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental laboratorium. Eksperimental laboratorium adalah metode yang dilakukan dengan melakukan percobaan secara langsung untuk mendapatkan variabel data tertentu yang berguna untuk melengkapi penelitian. Laboratorium yang digunakan adalah laboratorium bahan dan konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung. Hasil penelitian kemudian akan dianalisa untuk diambil kesimpulannya.

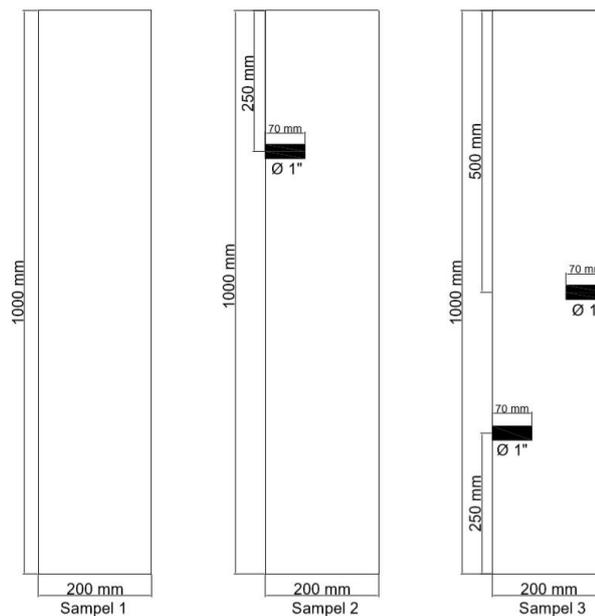
3.2. Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berbentuk balok dengan alas berukuran $200 \times 200 \text{ mm}^2$ dengan tinggi 1.000 mm sebanyak 3 (tiga) buah sampel.



Alas Permukaan

Gambar 3.1. Alas permukaan benda uji.



Gambar 3.2. Variasi benda uji.

Variasi benda uji terdiri dari tiga sampel yaitu, sampel 1 (satu) merupakan tiang tanpa kerusakan, sampel 2 (dua) merupakan tiang dengan satu kerusakan pada bagian sisi kiri, dengan kedalaman 250 mm dan sampel 3 (tiga) merupakan tiang dengan dua kerusakan pada bagian sisi kanan, dengan kedalaman 500 mm dan sisi kiri pada kedalaman 750 mm. Di mana semua kedalaman dihitung dari permukaan atas tiang. Setiap kerusakan yang sudah ditentukan dibuat dengan pipa PVC dengan diameter 1” dan panjang 70 mm.

3.3. Alat yang Digunakan

1. *Labquest 2*

Labquest 2 merupakan *monitor* dengan menggunakan sistem layar sentuh yang memudahkan penguji dalam pengambilan data, serta dapat menampilkan hasil dari pengujian secara langsung dan dapat disimpan langsung oleh penguji. Pada bagian atas alat *labquest 2* terdapat tombol *power on/off* dan tempat USB untuk menyimpan data. Untuk bagian samping terdapat tempat untuk penyambungan *3-axis accelerometer* dan adaptor untuk pengisian daya.



Gambar 3.3. *Labquest 2.*

2. *3-Axis Accelerometer*

3-axis accelerometer terbagi menjadi 2 (dua) bagian, di mana bagian *connector* terhubung langsung dengan *labquest 2* dan pada bagian *sensor* diangkurkan di atas permukaan tiang. *3-axis accelerometer* merupakan *sensor* tiga arah yang berfungsi untuk mengirimkan sinyal, sehingga menghasilkan getaran yang dapat dilihat pada layar *monitor* dan memiliki respon frekuensi 0-100 Hz. Hasil tersebut nantinya dianalisa untuk mendapatkan informasi mengenai karakteristik tiang.



Gambar 3.4. *Sensor.*

3. *Hand hammer*

Hand hammer digunakan untuk memukul kepala tiang sehingga akan menghasilkan getaran yang menyebar di sepanjang badan tiang. Hasil getaran akan tampil pada layar *monitor labquest 2* dalam bentuk grafik hubungan antara percepatan terhadap waktu.



Gambar 3.5. *Hand hammer.*

4. *Power supply*

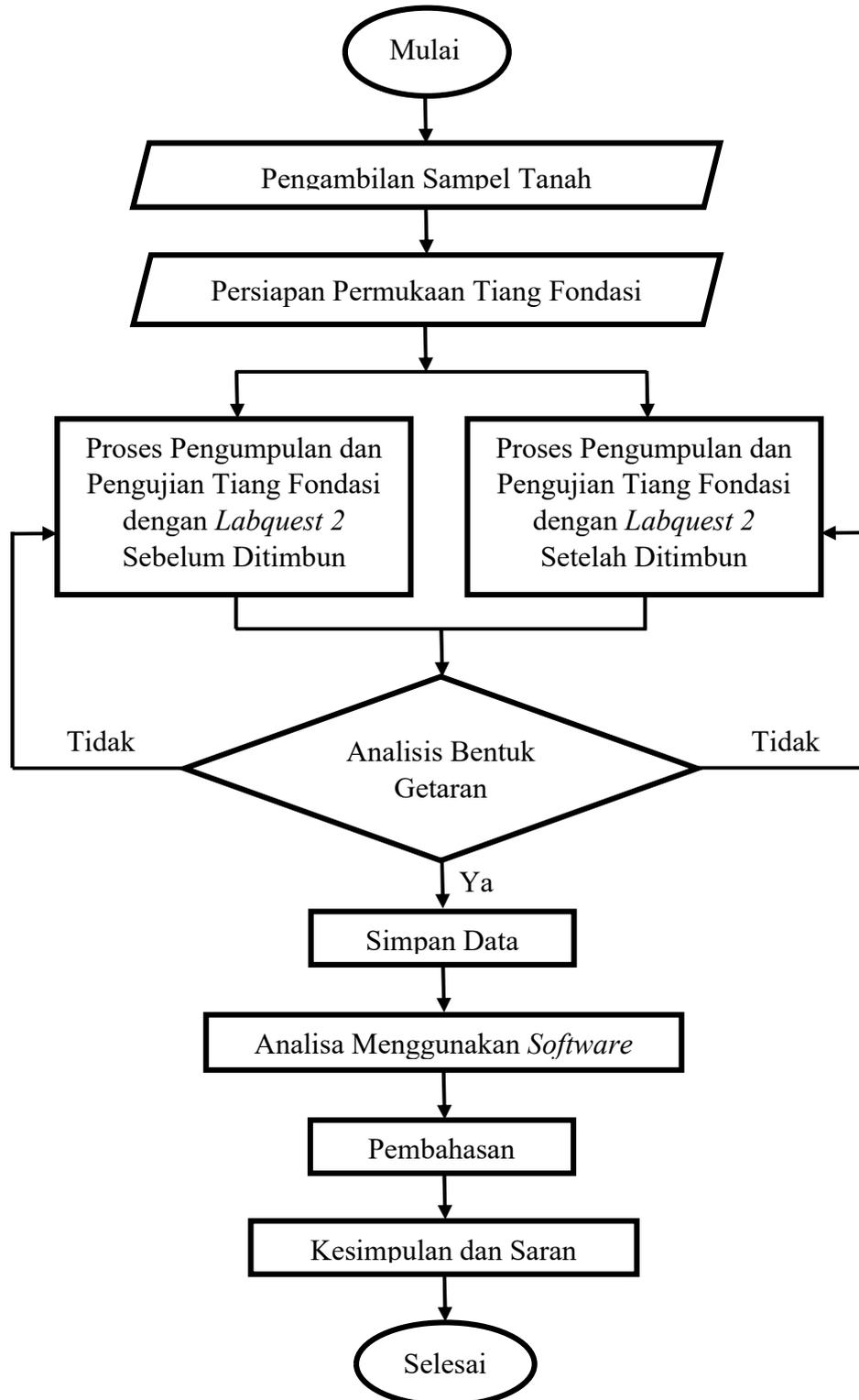
Power supply berfungsi untuk mengisi daya labquest 2.



Gambar 3.6. *Power supply.*

3.4. Prosedur Pengumpulan Data

3.4.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.7. Diagram alir penelitian.

3.4.2. Pengambilan Sampel Tanah

Pada penelitian ini, dilakukan pengambilan sampel tanah menggunakan metode *undisturbed* dengan *hand bor*. Sampel tanah yang telah diambil kemudian diuji di laboratorium untuk mendapatkan nilai *index properties* tanah.

3.4.3. Persiapan Permukaan Atas Tiang

Persiapan permukaan tiang merupakan langkah awal dalam pengumpulan data menggunakan alat *labquest 2*. Tempat yang harus dipersiapkan terdiri dari dua, pertama untuk meletakkan *sensor accelerometer* dan yang kedua untuk memberikan pukulan dengan menggunakan *hand hammer*. Kedua tempat tersebut harus benar-benar bersih dan tidak boleh terkontaminasi baik oleh tanah, air, butiran pasir atau sisa pengecoran beton. Untuk penentuan dua tempat tersebut sebaiknya berdekatan dengan pusat tiang.

3.4.4. Pemasangan Sensor (*Accelerometer*)

Adapun ketentuan cara pemasangan *sensor* berdasarkan *Iwin P-800 Pile Integrity Tester Operation Manual* adalah sebagai berikut :

1. Tidak boleh terdapat cacat atau retak di sekitar tempat pemasangan *sensor accelerometer*.
2. Apabila penempatan *area* titik palu berada di bagian tengah permukaan atas tiang, maka jarak antara pemasangan *area sensor accelerometer* dari bagian tengah tiang harus $\frac{2}{3}$ dari jari-jari tiang.
3. Apabila *area* titik palu tidak berada di tengah tiang maka jarak antara titik pemasangan *sensor accelerometer* dan titik palu tidak boleh kurang dari $\frac{1}{2}$ jari-jari tiang.

4. Untuk tiang pancang pra-tekan, maka titik pemasangan *sensor accelerometer* serta titik palu diletakkan pada sudut 90° dari bagian tengah tiang.
5. Untuk tiang pancang yang memiliki diameter besar, maka disarankan untuk melakukan pengujian 2-4 kali dengan titik yang berbeda.
6. Pada saat pemasangan hindari bagian yang memiliki masalah kualitas pada batang baja dan beton.

3.4.5. Langkah Pengumpulan Data

Adapun langkah-langkah untuk pengumpulan data dengan menggunakan *sensor 3-axis accelerometer* yang dihubungkan dengan *labquest 2* yaitu sebagai berikut :

1. Hubungkan *connector 3-axis accelerometer* pada bagian sisi samping *labquest 2*. Terdapat 3 (tiga) buah *connector* yaitu *connector* arah x, y, dan z. Pada bagian *sensor* diangkurkan di permukaan atas benda uji.



Gambar 3.8. Menghubungkan *3-axis accelerometer* ke *labquest 2*.



Gambar 3.9. Pengukuran *sensor*.

2. Tekan tombol “*on/off*” pada bagian atas *labquest 2* untuk mengaktifkan alat tersebut dan tunggu proses *loading* selama beberapa menit.



Gambar 3.10. Tekan tombol "*on/off*".

3. Pada layar *monitor* akan terlihat 3 (tiga) data frekuensi yang terdiri dari arah *x*, *y*, dan *z*.



Gambar 3.11. Tampilan data frekuensi arah *x*,*y*, dan *z*.

4. Klik *mode* pada layar dan pilih *time based*, lakukan pengaturan pada bagian *rate* dengan menuliskan 50 (lima puluh) sampel, dan pada bagian *duration* tuliskan 60 (enam puluh) *second*, terakhir klik tombol *done*.



Gambar 3.12. Pengaturan bagian *mode*.

5. Tahap selanjutnya adalah membuat semua data frekuensi baik arah x, y, dan z menjadi 0 (nol). Dengan cara menekan dan tahan untuk beberapa detik pada masing-masing arah lalu tekan “zero”.



Gambar 3.13. *Reset* data frekuensi menjadi 0 (nol).

- Setelah itu pada bagian pojok kiri bawah layar terdapat tombol (▶) untuk memulai pengambilan data, tekanlah tombol tersebut.



Gambar 3.14. Menekan tombol (▶).

- Ketuk benda uji, baik sebelum ditimbun maupun sesudah ditimbun dengan menggunakan *hand hammer* dan tunggu selama 60 (enam puluh) detik, kemudian hasil getaran akan tampil pada layar *monitor labquest 2*.



Gambar 3.15. Mengetuk benda uji sebelum ditimbun.



Gambar 3.16. Mengetuk benda uji setelah ditimbun.



Gambar 3.17. Hasil getaran pada layar.

- Langkah terakhir dari pengambilan data adalah menyimpan data hasil pengujian, kemudian data di *export* menggunakan USB untuk diolah menggunakan aplikasi *logger pro*.



Gambar 3.18. Simpan data hasil pengujian.

3.4.6. Analisis Bentuk Gelombang

Cek bentuk gelombang setelah pengambilan data pengujian, gelombang yang baik akan memiliki ciri-ciri sebagai berikut :

1. Bentuk gelombang setelah beberapa pukulan memiliki bentuk pengulangan yang baik.
2. Bentuk gelombang mencerminkan gambaran tiang yang sebenarnya serta pantulan gelombang pada dasar tiang terlihat jelas.
3. Bentuk gelombang halus dan tidak bergoyang.

3.4.7. Proses Pengolahan Data

Data sinyal gelombang yang telah dikumpulkan melalui pengujian di lapangan dengan menggunakan alat *labquest 2* akan disimpan dan dapat disalin ke komputer melalui *U-disk*. Kemudian rekaman data tersebut dapat dianalisa dengan menggunakan perangkat lunak berupa *logger pro* untuk menganalisis dan memproses semua data pengujian dan mengeluarkan laporan hasil pengujian.

3.5. Hipotesis Ilustrasi Hasil Gelombang

3.5.1. Akibat Tanah Sekitar

Dalam pengujian menggunakan metode refleksi gelombang regangan rendah perlu diperhatikan pengaruh tanah di sekitar tiang fondasi, hal ini dikarenakan dapat mempengaruhi bentuk kurva gelombang. Ketika lapisan tanah lunak berubah menjadi lapisan tanah keras di sekitar tiang, kurva bentuk gelombang akan menghasilkan refleksi gelombang yang serupa dengan perluasan diameter dapat dilihat pada Gambar 3.19. (Hertlein & Davis, 2006)



Gambar 3.19. Kurva gelombang dari tanah lunak ke tanah keras.

Gambar 3.20 menggambarkan ketika lapisan tanah keras berubah menjadi lapisan tanah lunak, kurva bentuk gelombang yang diperoleh akan menghasilkan gelombang refleksi yang serupa dengan pengurangan diameter. (Hertlein & Davis, 2006)

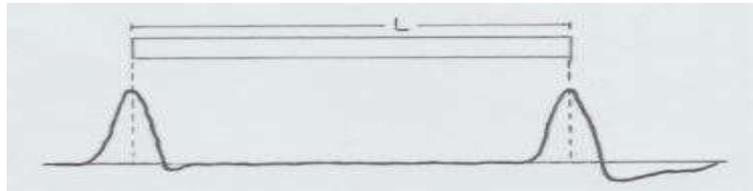


Gambar 3.20. Kurva gelombang dari tanah keras ke tanah lunak.

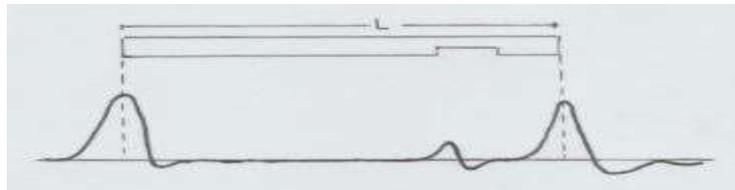
Jika pengguna tidak mempertimbangkan pengaruh tanah di sekitar tiang, hal ini dapat menyebabkan terjadinya salah penilaian. Oleh karena itu untuk menganalisis dan menilai kualitas tiang dengan lebih

baik, perlu untuk mengumpulkan dan memahami data yang relevan dari lokasi uji seperti data geologi, indeks fisik dan mekanis dari batuan dan tanah, serta distribusi dan arah lapisan tanah. Hal lain yang perlu diketahui adalah kadar air, rasio pori, modulus tekan, sudut gesek dalam, daya dukung fondasi, tahanan gesek samping dan tahanan ujung setiap lapisan dalam rentang panjang fondasi. (Hertlein & Davis, 2006)

3.5.2. Akibat Perubahan Impedansi Tiang



Gambar 3.21. Kurva gelombang tiang tanpa kerusakan.



Gambar 3.22. Kurva gelombang akibat reduksi impedansi.

Pada Gambar 3.21 mengilustrasikan bentuk kurva gelombang dengan menggunakan suatu hipotesis rekaman data kecepatan dengan bentuk tiang tanpa kerusakan, sedangkan untuk Gambar 3.22 merupakan hipotesis bentuk kurva gelombang jika terjadi reduksi impedansi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Pada subab ini berisi rangkuman kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai karakteristik tiang, baik sebelum ditimbun maupun sesudah ditimbun, yaitu sebagai berikut :

1. Untuk tiang fondasi dengan kerusakan lonjakan getaran hanya terlihat pada tiang sebelum ditimbun, untuk tiang sesudah ditimbun tidak terjadi lonjakan getaran pada titik kerusakan.
2. Pada bagian tiang yang terdapat kerusakan saat belum ditimbun, dasar tiang tidak terdeteksi karena tidak terjadi lonjakan getaran setelah lubang kerusakan hingga kedalaman fondasi.
3. Pada tiang fondasi tanpa kerusakan, baik sebelum maupun sesudah ditimbun didapatkan lonjakan getaran yang mendekati dasar tiang.
4. Lonjakan getaran yang menunjukkan dasar tiang rata-rata berada di kedalaman ± 900 mm dan terlihat jelas pada tiang setelah ditimbun dibandingkan sebelum ditimbun.
5. Pada tiang fondasi setelah ditimbun karena adanya pengaruh redaman tanah serta kerusakan yang dibuat di bawah 20% yaitu untuk satu kerusakan hanya sebesar 2,01% dan dua kerusakan sebesar 4,02%, kerusakan menjadi sulit untuk terdeteksi oleh *sensor*.
6. Pengaruh lainnya dikarenakan adanya perbedaan respon frekuensi pada *sensor* yang digunakan. Penelitian ini menggunakan *sensor 3-axis accelerometer* yang memiliki respon frekuensi sebesar 0-100 Hz,

sedangkan pada ASTM D5882-96 syarat minimal respon frekuensi untuk mendeteksi kerusakan pada tiang fondasi adalah 5.000 Hz.

7. *Sensor 3-axis accelerometer* yang digunakan dengan respon frekuensi 0 – 100 Hz, tetap dapat mendeteksi dasar tiang. Hal ini karena perubahan impedansi yang paling terlihat berada pada dasar tiang, karena terdapat perbedaan karakteristik antara material tiang beton dengan tanah di dasar tiang, salah satunya adalah perbedaan massa jenis.
8. Pada tiang fondasi setelah ditimbun hasil getaran lebih jelas dan rapat, lonjakan getaran hanya terjadi di beberapa titik, hal ini dapat dikarenakan pengaruh redaman dan kepadatan tanah di sekitar tiang.
9. Pada tiang fondasi sebelum ditimbun lonjakan getaran lebih sering terjadi dan getaran tidak terlalu rapat.
10. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa alat ini dapat mendeteksi dasar tiang dengan rata-rata deviasi sebesar 6,98%.
11. Pada saat tiang belum ditimbun alat ini dapat mendeteksi kerusakan dengan baik, hal ini dibuktikan dengan rata-rata deviasi sebesar 5,46%.

5.2. Saran

Penelitian ini memerlukan adanya pengembangan serta kajian lebih lanjut. Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut :

1. Pengambilan data getaran pada satu tiang fondasi dapat dibagi menjadi beberapa bagian lagi.
2. Perlu diperhatikan cara pengambilan data getaran, di mana pastikan permukaan tiang bersih dan rata serta kabel *accelerometer* tidak terganggu pada saat pengambilan data.

3. Untuk pengambilan data bisa menggunakan *sensor* dengan respon frekuensi yang lebih besar agar tingkat akurasi semakin tinggi, namun tetap pada alat yang berbasis *low strain*.
4. Untuk proses analisis dapat menggunakan *software* yang berbeda seperti *ABAQUS*, *MATLAB* dan lainnya.
5. Untuk benda uji berikutnya dapat ditambahkan kedalamannya dan kerusakan yang dibuat dapat diperbesar dan diperpanjang, serta beban ketukan yang diberikan dapat disamakan.
6. Jika tetap menggunakan *sensor* yang sama tambahkan kedalaman tiang, dan cek kembali apakah dasar tiang tetap dapat terdeteksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriantoro, S. R., Kawanda, A. 2019. Interpretasi Hasil Uji *Pile Integrity Test* Pada Fondasi Tiang Bor. Prosiding Seminar Intelektual Muda #2, Peningkatan Kualitas Hidup dan Peradaban Dalam Konteks IPTEKSEN. 359-364.
- Anggunadi, A., Sutarina, N. 2017. Manfaat *Accelerometer* Untuk Pengukuran Aktivitas Fisik. *Jurnal Olahraga Prestasi*. Volume 13, Nomor 1. 10-33.
- Annual Book of ASTM standards. 2017. *ASTM D5882-96 Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles*, ASTM Internasional. West Conshohocken, Pa.
- Hardiyatmo, H. R. 2008. *Teknik Fondasi II*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. 316 hlm.
- Hardiyatmo, H. R. 2011 . *Analisis & Perancangan Fondasi I*. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta. 604 hlm.
- Hertlein, B and Davis, A. 2006. *Nondestructive Testing Of Deep Foundations*. USA. John Wiley & Sons,Ltd. 292 hlm.
- Hibbeler, R.C. 2010. *Engineering Mechanics : Dynamics Twelfth Edition*. New Jersey. Pearson Prentice Hall. 752 hlm.
- Hingorani. 2019. *Interpretation of Low-Strain Pile Integrity Test Results*. Pilex India, Vadodara, Gujarat 390 011. India.
- Iwin-P800 Pile Integrity Tester Operation Manual*. Cangzhou. Cangzhou Iwin Testing Equipment Co.,ltd.
- Kartika, R. 2010. Pengujian Integritas Tiang Tanpa *Pile Cap* Dengan *Low Strain Method*. (Skripsi). Universitas Indonesia. Jakarta. 208 pp.

- Likins, G. Rausche, F. 2000. *Recent Advances and Proper Use of PDI Low Strain Integrity Testing. Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Niyama & Beim. Bukema, Rotterdam.
- Liong, G. T., 2011. *Sonic Logging Vs PIT Untuk Mendeteksi Integritas Fondasi Tiang*. ComTech Vol.2 No.2. 1031-1045.
- Marsh, B.K. 1997. *Design of Normal Concrete Mixes Second Edition*. Construction Research Communications Ltd. London. 46 hlm.
- Mustaqim, M. 2016. *Analisis dan Karakteristik Getaran Melalui Medium Tanah*. (Skripsi). Universitas Lampung. Lampung. 62 pp.
- Pujianto, A. 2005. *Pengaruh Beban Pada Permukaan Tanah dan Frekuensi Gempa Terhadap Respon Seismik Linier Elastis Lapisan Tanah*. Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Vol. 8, No.1. 12-29.
- Pujianto, A. 2009. *Pengaruh Lapisan Pasir di Bawah Fondasi terhadap Redaman dan Frekuensi Natural Akibat Beban Gempa*. Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Vol. 12, No.1. 28-43.
- Setiawan, A. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2824:2013*. Erlangga, Jakarta. 422 hlm.
- SNI 03-1974-1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Surya, Y. 2009. *Getaran dan Gelombang*. PT Kandel. Tangerang. 193 hlm.
- Wei, L. H. 2021. *Low Strain Detection and Numerical Simulation of Pile Integrity*. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. 10.1088/1755-1315/825/1/012026. China.