

## SURAT TUGAS

Nomor: 491-R/UNTAR/PENELITIAN/VIII/2023

Rektor Universitas Tarumanagara, dengan ini menugaskan kepada saudara:

1. **ANIEK PRIHATININGSIH, Ir., M.M.**
2. **ALI ISKANDAR, S.T., M.T**

Untuk melaksanakan kegiatan penelitian/publikasi ilmiah dengan data sebagai berikut:

Judul : PEMODELAN PARAMETER VIBRATION MONITORING TEST  
BERDASARKAN HASIL ITERASI NILAI RASIO REDAMAN (&#958;)  
Nama Media : Jurnal Mitra Teknik Sipil  
Penerbit : Program Studi Sarjana Teknik Sipil  
Volume/Tahun : Volume 6 /No. 2/Tahun 2023/ Mei  
URL Repository : <https://journal.untar.ac.id/index.php/jmts/issue/view/597>

Demikian Surat Tugas ini dibuat, untuk dilaksanakan dengan sebaik-baiknya dan melaporkan hasil penugasan tersebut kepada Rektor Universitas Tarumanagara

22 Agustus 2023

**Rektor**



**Prof. Dr. Ir. AGUSTINUS PURNA IRAWAN**

Print Security : 033f4fbd0fb220dcec3545cf1450193f

Disclaimer: Surat ini dicetak dari Sistem Layanan Informasi Terpadu Universitas Tarumanagara dan dinyatakan sah secara hukum.

### Lembaga

- Pembelajaran
- Kemahasiswaan dan Alumni
- Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat
- Penjaminan Mutu dan Sumber Daya
- Sistem Informasi dan Database

### Fakultas

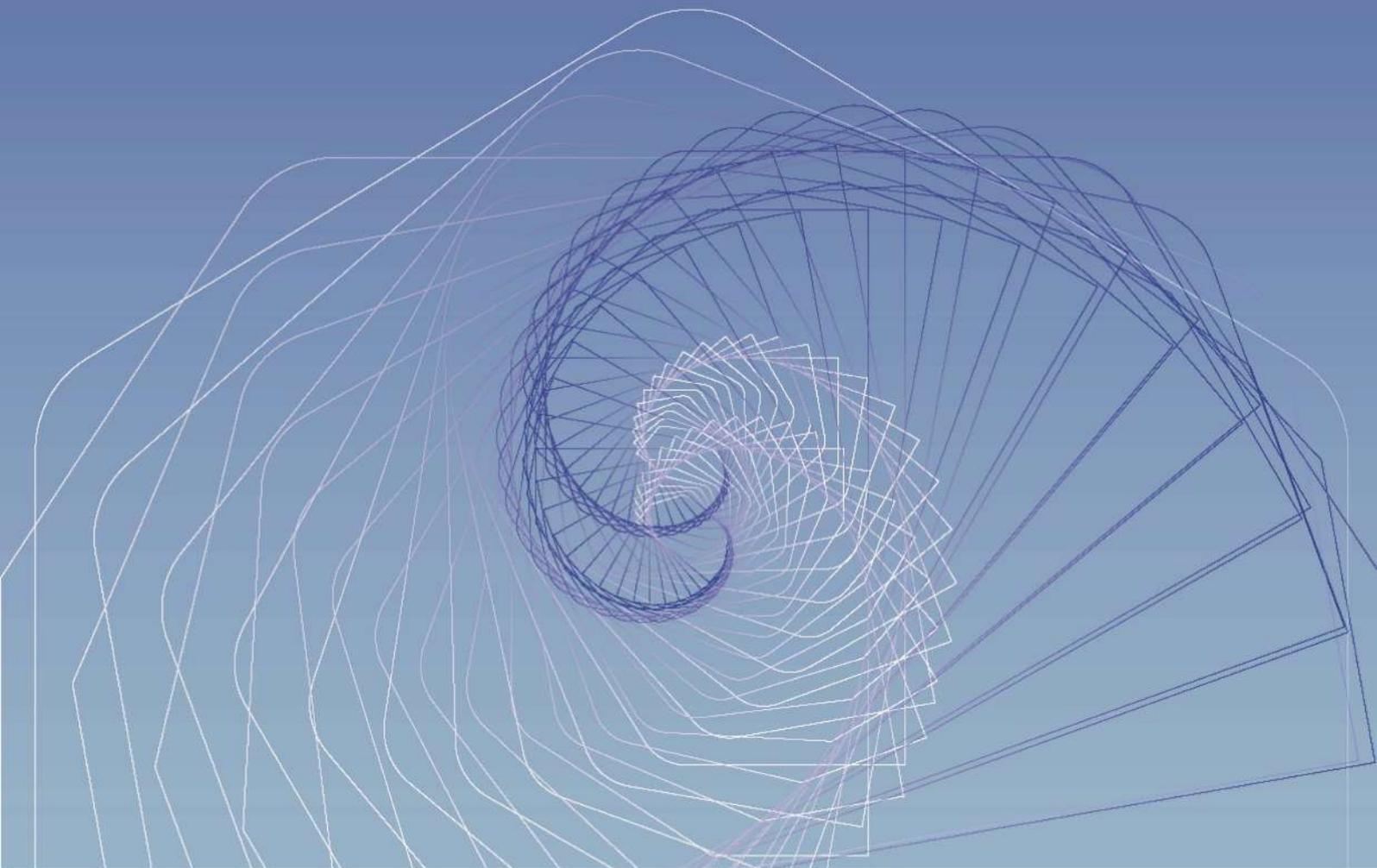
- Ekonomi dan Bisnis
- Hukum
- Teknik
- Kedokteran
- Psikologi
- Teknologi Informasi
- Seni Rupa dan Desain
- Ilmu Komunikasi
- Program Pascasarjana

# JMITS

JURNAL MITRA TEKNIK SIPIL

---

Volume 6 No. 2 Mei 2023



e-ISSN : 2622-545X  
Program Studi Sarjana Teknik Sipil UNTAR

## **JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil**

Volume 6, Nomor 2, Mei 2023

### **Redaksi**

<b>Ketua Penyunting</b>	Prof. Ir. Leksmono Suryo Putranto, M.T., Ph.D.
<b>Dewan Penyunting</b>	Dr. Widodo Kushartomo Ir. Aniek Prihatiningsih, M.M. Ir. Arianti Sutandi, M.Eng. Ir. Gregorius Sandjaja Sentosa, M.T. Ir. Sunarjo Leman, M.T. Yenny Untari Liucius, S.T., M.T.
<b>Penyunting Pelaksana</b>	Andy Prabowo, S.T., M.T., Ph.D. Vittorio Kurniawan, S.T., M.Sc. Arif Sandjaya, S.T., M.T.
<b>Mitra Bestari</b>	Prof. Ir. Roesdiman Soegiarso, M.Sc., Ph.D. (Universitas Tarumanagara) Prof. Ir. Chaidir Anwar Makarim, MCE., Ph.D. (Universitas Tarumanagara) Dr. Ir. Basuki Anondho, M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Ir. Najid, M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Ir. Wati Asriningsih Pranoto, M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Ir. Henny Wiyanto, M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Oei Fuk Jin (Universitas Tarumanagara) Dr. Usman Wijaya, S.T., M.T. (Universitas Kristen Krida Wacana) Dr. Nurul Fajar Januriyadi (Universitas Pertamina) Dr. Ir. Mega Waty, M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Daniel Christianto, S.T., M.T. (Universitas Tarumanagara) Dr. Eng. Luky Handoko (Universitas Atma Jaya Yogyakarta) Ir. Andryan Suhendra, M.T. (Binus University) Reynaldo Siahaan, S.T., M.T. (Universitas Katolik Santo Thomas)
<b>Alamat Redaksi</b>	Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara Alamat: Jl. Letjen S. Parman No.1, Jakarta Barat, 11440 Kampus 1 Gedung L Lantai 5 Telepon: 021-5672548 ext.331 E-mail: <a href="mailto:jmts@untar.ac.id">jmts@untar.ac.id</a>

## **JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil**

Volume 6, Nomor 2, Mei 2023

### **Kata Pengantar**

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil (E-ISSN 2622-545X) merupakan jurnal *peer-reviewed* yang dipublikasikan oleh Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara sebagai wadah peneliti, mahasiswa, dan dosen dari dalam maupun luar UNTAR untuk mempublikasikan makalah hasil penelitian dan studi ilmiah dalam bidang Teknik Sipil.

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil mempublikasikan artikel ilmiah pada bidang Teknik Sipil dengan sub-bidang sebagai berikut:

- Struktur
- Material Konstruksi
- Geoteknik
- Sistem dan Teknik Transportasi
- Manajemen Konstruksi
- Keairan

JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil terbitan Volume 6 Nomor 2 bulan Mei 2023 merupakan terbitan ke-20 sejak terbitan pertama pada Agustus 2018. Penerbitan JMTS dilakukan secara berkala setiap 3 bulan, yaitu pada bulan Februari, Mei, Agustus, dan November.

Dalam sejarah pelaksanaannya, makalah yang diterbitkan pada JMTS mengalami beberapa perubahan template penulisan untuk menghasilkan kualitas penulisan yang lebih baik, di antaranya penambahan abstrak dalam bahasa Inggris dan perubahan *style* referensi yang semula Harvard menjadi MLA dan sekarang menjadi APA.

Sejak terbitan Volume 3 Nomor 1 bulan Februari 2020, semua makalah diproses secara penuh melalui *Open Journal System* (OJS) yang dimulai dari proses *submission*, *reviewing*, *editing*, dan *publishing*.

Sejak terbitan Volume 5 Nomor 3 bulan Agustus 2022, OJS diperbarui menjadi versi ke 3.

Penerbitan jurnal ini dapat berlangsung secara maksimal berkat kontribusi berbagai pihak. Kami kepada tim editor yang telah membantu mengawal proses penerbitan. Penghargaan juga kami sampaikan kepada Reviewer yang telah berkenan memberikan saran perbaikan untuk menjaga kualitas jurnal. Semoga jurnal ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu Teknik Sipil.

Salam,

Tim Redaksi Jurnal Mitra Teknik Sipil

## **JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil**

Vol. 6 No. 2, Mei 2023

### **Daftar Isi**

OPTIMASI PEMAKAIAN SERAT ROSELLA PADA CAMPURAN BETON DENGAN VARIASI MAKSIMUM UKURAN AGREGAT 10 MM, 15 MM, DAN 25 MM <i>M. Bobby Hasan Arfani, Bertinus Simanihuruk, dan Hikma Dewita</i>	186-190
IDENTIFIKASI WASTE PROYEK INFRASTRUKTUR TRANSMISI LISTRIK DENGAN <i>VALUE STREAM MAPPING</i> <i>Grace Notarica Simamora, Mona F Toyfur, dan Heni Fitriani</i>	191-206
PENGARUH KERAPATAN WIREMESH TERHADAP KAPASITAS LENTUR PELAT BETON RINGAN KOMPOSIT <i>Jonathan Aaron dan Widodo Kushartomo</i>	207-216
ANALISIS SAMBUNGAN PURUS ( <i>TONGUE AND GROOVE JOINTS</i> ) PADA DINDING PANEL BETON RINGAN <i>STYROFOAM</i> <i>Anthony Wisselly dan Widodo Kushartomo</i>	217-222
PERINGKAT DAN FAKTOR PENYEBAB <i>WASTE MATERIAL</i> PADA PROYEK X DI SERPONG <i>Andrew Johannes Gultom dan Arianti Sutandi</i>	223-236
PENERAPAN METODE <i>EARNED VALUE</i> DAN <i>EARNED SCHEDULE</i> PELAKSANAAN PROYEK RUMAH SAKIT X DI BANDUNG <i>Reynaldo Farrel Fausta Tangtobing dan Mega Waty</i>	237-248
ANALISIS <i>VALUE ENGINEERING</i> PADA PROYEK PERUMAHAN X DI TANGERANG SELATAN <i>Robert Chandra, Arianti Sutandi, dan Basuki Anondho</i>	249-260
ANALISIS BANGUNAN BERUNDAK DENGAN KETINGGIAN 4, 8, 12, 16, 20, DAN 24 LANTAI PADA TIANG UJUNG <i>Kevin Anderson dan Alfred Jonathan Susilo</i>	261-270
ANALISIS PANDANGAN MASYARAKAT TERHADAP JASA ANTAR MAKANAN AIRASIA FOOD <i>Nadia Angeline dan Leksmono Suryo Putranto</i>	271-284
ANALISIS PERILAKU MASYARAKAT TERHADAP BERKENDARA LAMBAT DI LAJUR CEPAT ATAU MENDAHULUI PADA JALAN BEBAS HAMBATAN <i>Evan Grysvia dan Leksmono Suryo Putranto</i>	285-300
ANALISIS EFISIENSI TIANG UJUNG PADA FONDASI TIANG BOR DI PROYEK GADING SERPONG <i>Nathania Olivia Fernanda dan Alfred Jonathan Susilo</i>	301-308

CARA MUDAH MENENTUKAN MATERIAL TERBAIK DALAM STRUKTUR JALAN MENGGUNAKAN METODE MARSHALL TEST <i>Lana Juniantoro Eko Saputro, Andri Dwi Cahyono, Evita Fitriani Hidiyati, Ahmad Iqbal Zulqornain Azma, Safril Enra Firmansyah, Arthur Fajar Anosaputra, Muhammad Setio Aji, dan Galih Dwi Kurniawan</i>	309-320
METODE PERBAIKAN TANAH DENGAN <i>PREFABRICATED VERTICAL DRAIN</i> (PVD) PADA JALAN TOL SERPONG-BALARAJA SEKSI 1B <i>Shendy dan Gregorius Sandjaja</i>	321-332
ANALISIS JUMLAH CARBON FOOTPRINT SEMEN PADA PEKERJAAN PLESTER DINDING PROYEK RUMAH TINGGAL <i>Marcell dan Basuki Anondho</i>	333-342
STUDI PEFORMA SPUN PILE DENGAN PERKUATAN STEEL JACKET KE PILE CAP AKIBAT PEMBEBANAN SIKLIK HORIZONTAL <i>Jansen Reagen, Mulia Orientilize, Widjojo Adi Prakoso, Yuskar Lase, dan Sidiq Purnomo</i>	343-354
PENGARUH LINGKUNGAN KERJA, PELAKSANAAN K3, DAN TENAGA KERJA TERHADAP PRODUKTIVITAS TENAGA KERJA <i>Vincentius Wijaya dan Mega Waty</i>	355-366
DAMPAK CHANGE ORDER PROYEK KONSTRUKSI BANGUNAN GEDUNG BERTINGKAT SEDANG <i>Kevin Lakaoni dan Mega Waty</i>	367-382
<i>NONLINEAR TIME HISTORY</i> PADA FONDASI TIANG PANCANG DENGAN PROGRAM MIDAS GTS NX <i>Ardi Suryadi, Hendy Wijaya, dan Amelia Yuwono</i>	383-392
ANALISIS PENURUNAN JALAN DI ATAS TANAH GAMBUT TANPA PERBAIKAN DI PEKANBARU <i>Jonathan Wansons Khohara dan Aniek Prihatiningsih</i>	393-406
ANALISIS PENGGUNAAN BETON PRACETAK DI PROYEK PEMBANGUNAN MALL XYZ KOTA WISATA <i>Hansen Chandra Koesoema, Widodo Kushartomo, dan Andy Prabowo</i>	407-414
<b>PEMODELAN PARAMETER <i>VIBRATION MONITORING TEST</i> BERDASARKAN HASIL ITERASI NILAI RASIO REDAMAN (<math>\xi</math>)</b> <i>Veronica, Aniek Prihatiningsih, dan Ali Iskandar</i>	<b>415-428</b>
PENYEBAB <i>CHANGE ORDER</i> PROYEK KONSTRUKSI RUMAH SAKIT <i>Daniel dan Mega Waty</i>	429-440
SIFAT MEKANIS BETON RINGAN DENGAN STYROFOAM SEBAGAI MEDIA PEMBENTUK UDARA <i>Jonathan Andryanto dan Widodo Kushartomo</i>	441-448
METODE PAIRED COMPARISON PADA PEKERJAAN PONDASI BANGUNAN GEDUNG DENGAN PENDEKATAN STUDI VALUE ENGINEERING (VE) <i>Mahdika Putra Nanda, Sigit Riswanto, dan Mega Kurniawati</i>	449-456

PENGARUH SEMANGAT KERJA TERHADAP PROGRESS PADA PROYEK GUDANG SURYA GRAND CISOKA <i>Carlos Chandra dan Widodo Kushartomo</i>	457-462
SOLUSI MENURUNKAN ANGKA KECELAKAAN KERJA PADA PROYEK KONSTRUKSI BERTINGKAT <i>Jen Sen Chiu Santo dan Widodo Kushartomo</i>	463-470
ANALISIS DAYA DUKUNG DAN EFISIENSI TIANG PADA TANAH PASIR PADAT DAN PASIR LEPAS DENGAN KONFIGURASI TIANG 4, 9, 16 <i>Christopher Benjiro dan Alfred Jonathan Susilo</i>	471-484
STUDI PERBANDINGAN ANALISIS FEM 2D DAN 3D PADA STABILITAS SHEET PILE LONG STORAGE KOTA JAKARTA <i>Serli Yulianti, Muhammad Riza, dan Vitta Pratiwi</i>	485-494
PEMETAAN RISIKO MULTIBENCANA ALAM PADA INFRASTRUKTUR JALAN <i>Jaya Iskandar, Roi Milyardi, dan Cindrawaty Lesmana</i>	495-510
PENENTUAN NILAI KONDISI GEDUNG BERDASARKAN METODE <i>PORTUGUESE URBAN TENANCY REGIME</i> PADA GEDUNG BERTINGKAT TINGGI <i>Chrisitan Tjenndrawinata dan Henny Wiyanto</i>	511-518
KAJIAN PENGARUH <i>RISE-SPAN RATIO</i> PADA JEMBATAN <i>TIED ARCH</i> <i>Eko Felix Songbes, Made Suangga, dan Sunarjo Leman</i>	519-528
ANALISIS KELAYAKAN INVESTASI PEMBANGUNAN KANTOR UNTUK PERUSAHAAN BATU ALAM DENGAN METODE <i>REAL OPTION VALUATION</i> <i>Julian Kietowibowo, Mark Setiadi, dan Wati A. Pranoto</i>	529-544

## PEMODELAN PARAMETER VIBRATION *MONITORING TEST* BERDASARKAN HASIL ITERASI NILAI RASIO REDAMAN ( $\xi$ )

Veronica<sup>1</sup>, Aniek Prihatiningsih<sup>2</sup>, dan Ali Iskandar<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*veronica.325190065@stu.untar.ac.id*

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*aniekp@ft.untar.ac.id*

<sup>3</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia  
*ali.iskandar1999@gmail.com*

Masuk: 19-01-2023, revisi: 01-03-2023, diterima untuk diterbitkan: 03-05-2023

### ABSTRACT

*The driven pile foundation is a foundation structure that not only withstands static loads but also dynamic loads due to vibrations generated during the pile driving process. It's not impossible that the vibrations can cause damage to both the foundation structure itself and the surrounding building structures. Therefore, in this study dynamic soil modeling was carried out based on the dynamic parameters from the finite element back analysis of the Vibration Monitoring Test (VMT) which was measured using a geophone placed at a distance of 80 m from the vibration source originating from the foundation pile driving activity. The VMT parameter that was used was acceleration  $a_y = 0,025 \text{ m/s}^2$ . The VMT parameter is modeled using a 2D finite element application and the dynamic parameter is obtained in the form of a damping ratio of 0,22 % with a percentage difference of 0,66 %. From the dynamic parameters that have been obtained, further research can be made by modeling the structure of the dynamic soil and analyzing the damage it causes.*

*Keywords: Vibration Monitoring Test (VMT); damping ratio; pile driving; seismic wave; finite element*

### ABSTRAK

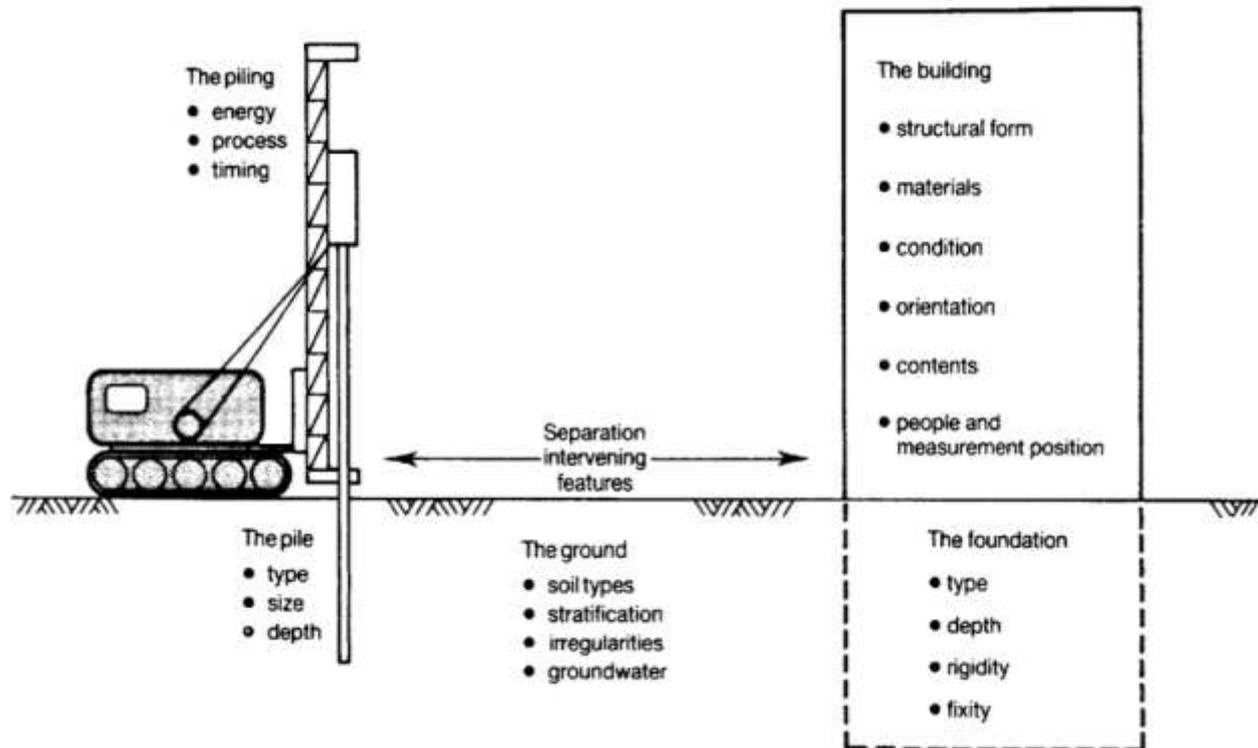
Fondasi tiang pancang merupakan struktur fondasi yang tidak hanya menahan beban statis melainkan juga beban dinamik akibat getaran yang ditimbulkan ketika proses pemancangan tiang. Bukan hal yang tidak mungkin getaran tersebut dapat menyebabkan kerusakan baik pada struktur fondasi itu sendiri maupun bagi struktur bangunan yang ada di sekitarnya. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pemodelan tanah dinamik berdasarkan parameter dinamik dari *back analysis finite element Vibration Monitoring Test* (VMT) yang diukur menggunakan alat *geophone* yang diletakkan pada titik dan jarak 80 m dari sumber getaran yang berasal dari aktivitas pemancangan tiang fondasi dengan parameter VMT yang digunakan adalah percepatan  $a_y = 0,025 \text{ m/s}^2$ . Parameter VMT tersebut dimodelkan menggunakan aplikasi elemen hingga 2D dan diperoleh parameter dinamik berupa rasio redaman sebesar 0,22 % dengan persentase perbedaan sebesar 0,66 %. Dari parameter dinamik yang telah diperoleh, dapat dibuat penelitian lanjutan dengan memodelkan struktur pada tanah dinamik tersebut dan dianalisis dampak kerusakan yang ditimbulkannya.

Kata kunci: *Vibration Monitoring Test* (VMT); rasio redaman; pemancangan tiang; gelombang seismik; elemen hingga

## 1. PENDAHULUAN

Tiang pancang merupakan fondasi dalam yang digunakan untuk mentransmisikan beban bangunan melalui lapisan tanah yang lemah ke lapisan tanah atau batuan yang lebih kuat (Ramshaw, 2002). Pada dasarnya pemancangan fondasi tiang dilakukan dengan berbagai macam metode menggunakan alat pemukul (*hammer*) (Vesic, 1977). Kegiatan pemancangan tersebut menyebabkan getaran pada tanah yang mungkin dapat mengganggu bahkan merusak bangunan di area sekitar. Oleh karena itu, sebagai tindak pencegahannya perlu dilakukan pengujian dan pemantauan mengenai besarnya getaran yang terjadi saat pemancangan menggunakan alat pendeteksi getaran berupa *geophone*. Hasil dari pengujian tersebut nantinya dapat digunakan untuk mengetahui dampak dari getaran yang terjadi dan batas besar getaran yang aman bagi area sekitar pemancangan.

Sebenarnya, besar getaran tersebut dapat diketahui dengan perhitungan secara analitis menggunakan persamaan empiris. Selain itu, dapat juga dilakukan komputasi dengan cara memodelkan keadaan tanah di lapangan dan fondasi yang digunakan pada suatu aplikasi dengan metode *finite element* (elemen hingga). Meskipun besar getaran dapat diukur secara akurat, efek dari getaran tersebut tidak dapat diperkirakan secara pasti karena variabel yang sangat kompleks, mulai dari kondisi tanah, jarak antara objek dan jenis struktur di area sekitar pemancangan hingga jenis fondasi yang digunakan seperti yang dijelaskan melalui Gambar 1.



Gambar 1. Variabel getaran tanah akibat pemancangan (Head & Jardine, 1992)

Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan parameter dinamik secara komputasional dengan aplikasi elemen hingga 2D dari parameter VMT. Parameter VMT didapatkan dengan menggunakan alat pendeteksi getaran berupa *geophone* yang diukur dalam empat arah dengan tiga jarak berbeda dan parameter getaran yang diukur menggunakan alat tersebut berupa *Particle Peak Velocity* (PPV, mm/s), *frequency* (Hz), *displacement* (micron) dan *acceleration* (g's). Untuk mempermudah dan mempercepat waktu analisis, pemodelan hanya dilakukan untuk parameter VMT berupa percepatan vertikal ( $a_y$ ). Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan nilai rasio redaman yang dapat memodelkan parameter VMT ke dalam aplikasi elemen hingga yang nantinya dapat digunakan untuk mengetahui efek getaran tersebut terhadap struktur di sekitarnya.

### ***Vibration Monitoring Test* (VMT)**

*Vibration Monitoring Test* (VMT) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengecek atau memonitor getaran yang terjadi seperti saat pemancangan tiang fondasi. Pengujian dilakukan menggunakan seismograf berupa Mini-Supergraf. Perangkat VMT terdiri dari 1 buah alat transduser kecepatan (*geophone*) yang dapat menerima gelombang getaran secara tiga dimensi (*triaxial*) serta terhubung ke *Chanel Amplifier Computer* dan *Fast Fourier Transform* sebagai perangkat lunak untuk analisis dinamik serta kabel konektor.

Cara kerja alat VMT ini yaitu dengan menancapkan *geophone* yang ditunjukkan oleh lingkaran merah pada Gambar 2 pada titik tertentu dari sumber getaran. Kemudian, hasilnya dibaca menggunakan *display* LCD yang ditunjukkan oleh lingkaran kuning pada Gambar 2.

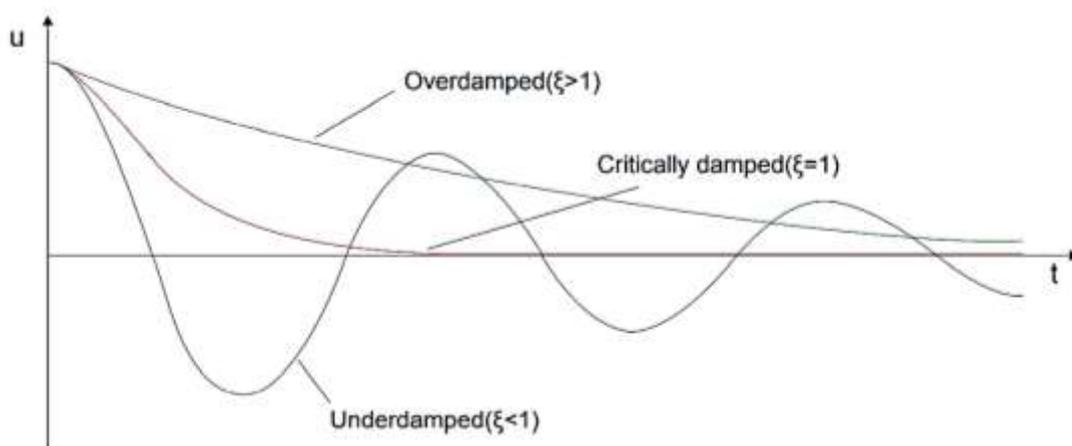
### **Rasio redaman ( $\xi$ )**

Pada perhitungan akibat beban dinamik, diperlukan perhitungan redaman pada material dan parameter umum yang digunakan yaitu rasio redaman ( $\xi$ ). Terdapat juga koefisien Rayleigh yaitu  $\alpha$  dan  $\beta$  yang merupakan redaman suatu material yang disebabkan oleh viskositas tanah, gesekan dan regangan tetap. Berdasarkan Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa rasio redaman bernilai  $\xi = 1$  untuk redaman kritis (*critically damped*) di mana jumlah redaman yang dibutuhkan

untuk terjadinya *single degree-of-freedom system* yang bergerak dari perpindahan awal ( $U_0$ ) perlahan berhenti tanpa adanya gelombang. Sedangkan, pada redaman berlebih (*overdamped*) bernilai  $\xi > 1$  di mana sistem membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai posisi setimbang.



Gambar 2. Seismograf dari NOMIS tipe mini-supergraph



Gambar 3. Peran rasio redaman  $\xi$  dalam getaran bebas pada *single degree-of-freedom system* (Bentley, 2022)

### Metode elemen hingga (*Finite Element*)

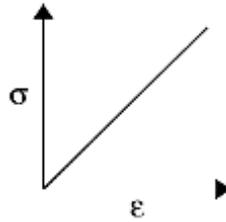
Prinsip dasar metode elemen hingga yaitu menyederhanakan komponen model aktualnya dan mengidentifikasinya dengan jumlah elemen yang terbatas (Logan, 2012). Elemen hingga terdiri dari tiga macam yaitu elemen hingga 1D, 2D, dan 3D. Pada elemen hingga 2D, penampang struktur dapat dimodelkan dalam bentuk *plane strain* dan *axisymmetric* di mana model *plane strain* digunakan pada penampang melintang dengan beban memanjang tegak lurus dengan penampang. Dalam penelitian ini, akan digunakan program bertujuan khusus. Ada dua komponen yang akan dimodelkan dengan metode elemen hingga yaitu lapisan tanah dan pemancangan tiang tunggal di mana material tanah akan diberikan parameter dinamik berupa rasio redaman hingga mendapat percepatan tanah sesuai parameter VMT yang dimodelkan dalam aplikasi elemen hingga 2D.

Dalam pemodelan *finite element*, digunakan 2 macam model material, yaitu:

1) *Linear elastic model*

Pemodelan ini termasuk yang paling sederhana di mana tegangan ( $\sigma$ ) berbanding lurus terhadap regangan ( $\epsilon$ ) yang dapat dilihat pada Gambar 4. Material dianggap dapat kembali ke posisi semula ketika beban dilepaskan tanpa adanya deformasi secara permanen. Pemodelan ini kurang cocok untuk material tanah yang sifatnya nonlinear dan tidak dapat berubah. Hal ini membuat pemodelan tersebut terlalu terbatas untuk dapat mensimulasikan perilaku tanah yang sebenarnya. Namun, pemodelan ini dapat dipertimbangkan untuk

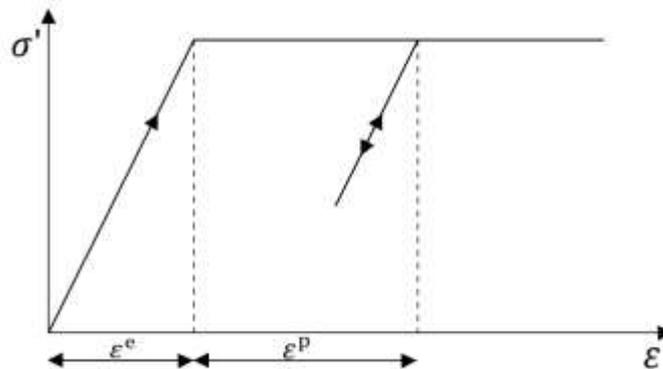
memodelkan struktur yang memiliki kekuatan yang tinggi dalam tanah maupun lapisan batuan serta tanah lempung dengan tegangan yang rendah (Brinkgreve & Broere, 2006; Lees, 2016).



Gambar 4. Kurva linear elastic model (Koven, 2014)

## 2) Mohr-Coulomb

Model ini merupakan model *nonlinear* yang paling sederhana namun tidak semua perilaku tanah dapat dimodelkan dengan *Mohr-Coulomb model*. *Mohr-Coulomb model* dapat digunakan untuk menghitung daya dukung realistik dan keruntuhan fondasi serta analisis lainnya di mana kegagalan tanah memiliki peran yang paling dominan (Brinkgreve & Broere, 2006). Pemodelan material dengan *Mohr-Coulomb model* menganggap bahwa material bersifat elastis ( $\epsilon^e$ ) pada awal pembebanan yang ditunjukkan dengan garis linear di mana material masih dapat kembali ke posisi semula. Seiring dengan bertambahnya waktu pembebanan, material tersebut akan bersifat plastis ( $\epsilon^p$ ) di mana tidak dapat kembali lagi ke posisi semula yang ditunjukkan dengan fungsi  $f=0$  berupa garis lurus horizontal yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kurva Mohr-Coulomb (MC) model (Bentley, 2022)

## Gelombang seismik

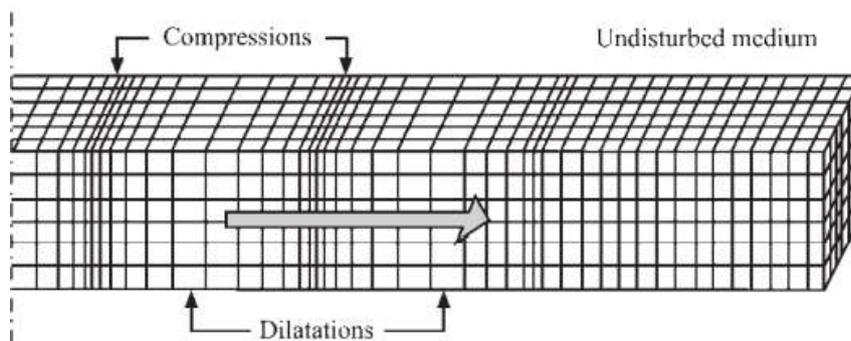
Getaran diartikan sebagai gerak bolak-balik yang terjadi berulang-ulang pada suatu benda dan melewati titik keseimbangannya. Getaran dapat didefinisikan dengan besaran-besaran seperti perpindahan, amplitudo yang besarnya dinyatakan dalam perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*) serta percepatan (*acceleration*), periode, dan frekuensi. Getaran yang merambat disebut sebagai gelombang (Devianta, 2013). Sedangkan gelombang seismik dapat diartikan sebagai gelombang yang terjadi karena adanya gangguan di dalam bumi, biasanya disebabkan oleh gempa bumi, pemancangan tiang fondasi ataupun ledakan. Jenis gelombang seismik dibagi menjadi dua yaitu gelombang badan dan gelombang permukaan. Gelombang badan terjadi terlebih dahulu dan kemudian disusul dengan gelombang permukaan dengan amplitudo getaran yang lebih besar. Penjelasan lebih lengkap mengenai kedua gelombang tersebut adalah sebagai berikut:

### 1) Gelombang Badan (*Body Waves*)

Gelombang badan dapat digambarkan sebagai gerak gelombang melalui lapisan dalam bumi (Elnashai & Sarno, 2008). Gelombang badan dibagi menjadi dua yaitu:

#### a. Gelombang Longitudinal (*P-Wave*)

Gelombang longitudinal dapat diartikan sebagai gelombang yang arah rambatnya berimpit dengan arah getarnya dan terjadi akibat adanya rapatan dan renggangan. Rapatan dan renggangan ini dapat terjadi pada semua wujud zat, baik zat padat, cair maupun gas (Devianta, 2013). Contoh dari gelombang longitudinal yaitu gelombang slinki. Ilustrasi bentuk dan arah dari gelombang longitudinal atau *P-Wave* dapat dilihat melalui Gambar 6.



Gambar 6. Gelombang longitudinal (P-Wave) (Elnashai & Sarno, 2008)

Kecepatan dari gelombang longitudinal lebih cepat dibanding gelombang transversal. Gelombang ini adalah yang terasa pertama kali saat terjadi gempa bumi. Kecepatan gelombang longitudinal dapat dihitung menggunakan Persamaan 1-3.

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-v)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1-v)} \quad (3)$$

dan jika persamaan  $\lambda$  dan  $G$  disubstitusikan, maka persamaan  $v_p$  akan menjadi Persamaan 4-5.

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{\gamma_{dry}}{g} \quad (5)$$

keterangan:

$v_p$  : kecepatan gelombang longitudinal (m/s)

$\lambda$  : panjang satu gelombang (m)

$G$  : modulus geser ( $\text{kN/m}^2$ )

$\rho$  : massa jenis tanah ( $\text{kN/m}^3$ )

$E$  : modulus elastisitas ( $\text{kN/m}^2$ )

$v$  : poisson *ratio*

$\gamma_{dry}$  : berat isi tanah kering ( $\text{kN/m}^3$ )

$g$  : percepatan gravitasi ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

b. Gelombang Transversal (S-Wave)

Gelombang transversal merupakan gelombang yang memiliki arah rambat tegak lurus terhadap arah getarnya. Contohnya dari gelombang transversal yaitu gelombang tali dan gelombang pada air (Devianta, 2013). Untuk ilustrasi gelombang transversal atau S-Wave dapat dilihat melalui Gambar 7.

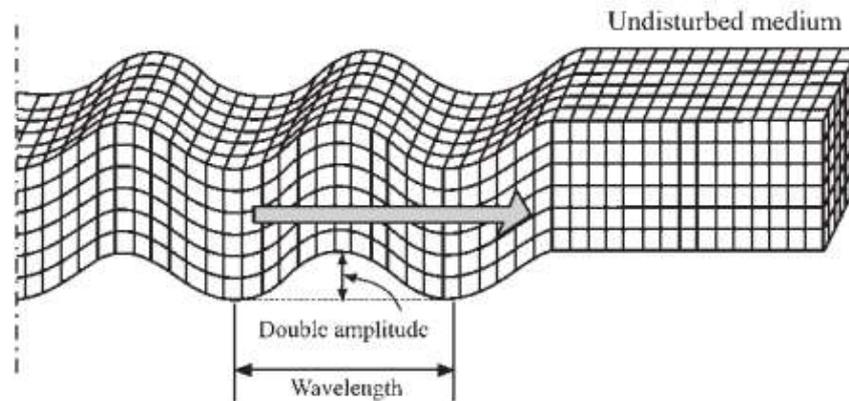
Kecepatan gelombang transversal dapat dihitung menggunakan Persamaan 6.

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+v)\rho}} \quad (6)$$

keterangan:

$v_s$  : kecepatan gelombang transversal (m/s)

Dalam SNI 1726:2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung, kecepatan rata-rata gelombang transversal dapat dicari menggunakan Persamaan 7.



Gambar 7. Gelombang transversal (S-Wave) (Elnashai & Sarno, 2008)

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (7)$$

keterangan:

$\bar{v}_s$  : kecepatan rata-rata gelombang transversal (m/s)

$d_i$  : tebal tiap lapisan antara kedalaman 0 sampai 30 m (m)

$v_{si}$  : kecepatan gelombang transversal lapisan ke-i (m/s)

Persamaan dari kecepatan gelombang longitudinal dan transversal dapat dikombinasikan sehingga menjadi Persamaan 8.

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (8)$$

## 2) Gelombang Permukaan (*Surface Waves*)

Gelombang permukaan dapat diartikan sebagai gelombang yang gerakkannya hanya terjadi pada lapisan permukaan bumi contohnya seperti riak di atas air (Suhairy, 2000). Gelombang permukaan dibagi menjadi dua yaitu:

### - Gelombang Love (*Love Waves*)

Gelombang Love merupakan gelombang permukaan tercepat dan mampu membuat pergerakan perpindahan pada tanah (Suhairy, 2000). Ilustrasi gelombang Love dapat dilihat melalui Gambar 8. Kecepatan gelombang love dapat dihitung menggunakan Persamaan 9.

$$v_l = \tan \left[ Hw \left( \frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right)^{1/2} \right] \quad (9)$$

keterangan:

$v_l$  : kecepatan gelombang Love (m/s)

H : ketebalan lapisan (m)

W : frekuensi granular (rad/s)

$\beta_1, \beta_2$  : kecepatan gelombang pada medium 1 dan 2 (m/s)

### - Gelombang Rayleigh (*Ground Roll*)

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang yang menggulung di sepanjang permukaan tanah seperti ombak yang di danau ataupun lautan (Suhairy, 2000). Ilustrasi gelombang Rayleigh dapat dilihat melalui Gambar 9 dan Persamaan 10.

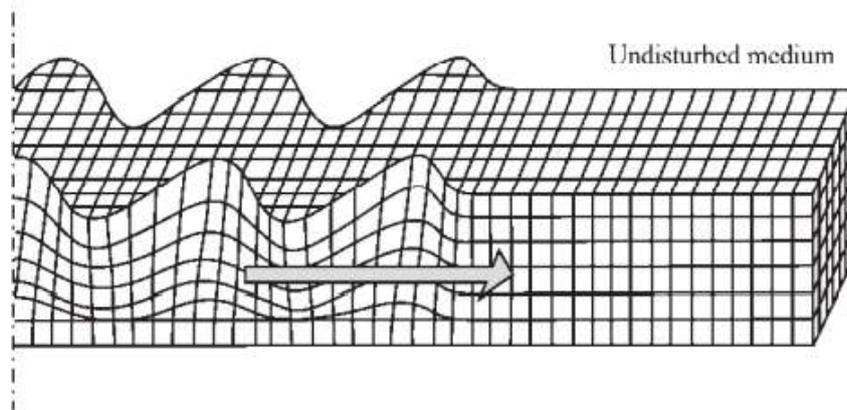
$$v_r = \frac{\omega}{f} \quad (10)$$

keterangan:

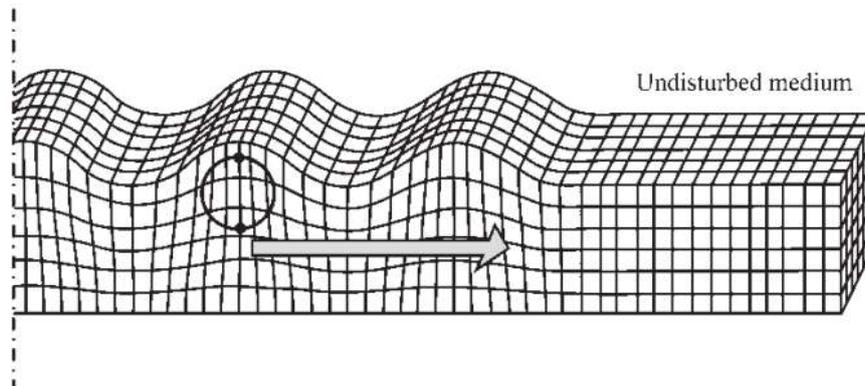
$V_r$  : kecepatan gelombang Rayleigh (m/s)

$\omega$  : kecepatan sudut (rad/s)

f : frekuensi ( $H_z$ )



Gambar 8. Gelombang Love (Elnashai & Sarno, 2008)

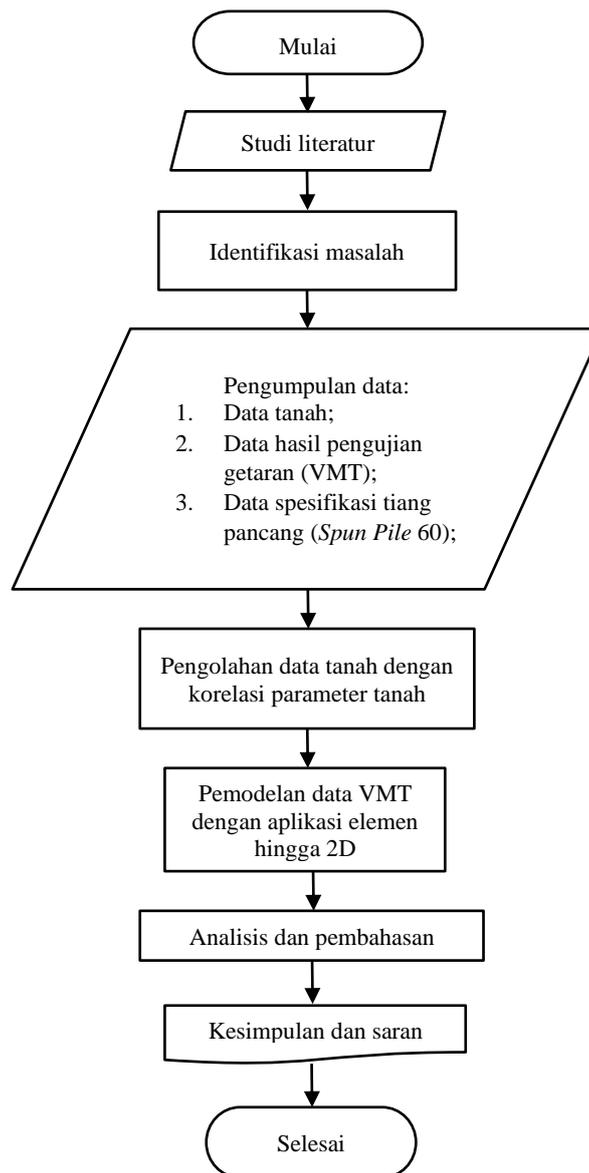


Gambar 9. Gelombang Rayleigh (Elnashai & Sarno, 2008)

## 2. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, langkah-langkah penelitian dapat dijelaskan menggunakan diagram alir pada Gambar 10 yang dapat diuraikan sebagai berikut:

- 1) Melakukan studi literatur mengenai permasalahan yang terjadi serta Vibration Monitoring Test (VMT), rasio redaman ( $\xi$ ), metode elemen hingga, dan gelombang sesimik.
- 2) Setelah melakukan studi literatur, masalah dapat diidentifikasi lebih jelas mengenai pemecahan atau solusinya. Pada penelitian ini pemecahan masalah dilakukan dengan memodelkan parameter VMT berdasarkan hasil iterasi rasio redaman.
- 3) Melakukan pengumpulan data yang dibutuhkan meliputi data tanah, data hasil uji getaran (VMT), dan data spesifikasi tiang pancang yang digunakan yaitu spun pile 60.
- 4) Melakukan pengolahan parameter tanah yang kurang dari data hasil uji Boring Log.
- 5) Memodelkan proses pemancangan tiang menggunakan aplikasi elemen hingga 2D sekaligus mencoba secara berulang parameter dinamik dengan nilai rasio redaman berbeda hingga mendapatkan parameter VMT di lapangan yang paling mendekati.
- 6) Melakukan analisis dan pembahasan mengenai nilai rasio redaman yang menghasilkan parameter VMT paling mendekati.
- 7) Memberikan kesimpulan hasil analisis beserta saran untuk penelitian lanjutan.



Gambar 10. Diagram alir penelitian

### Pemodelan parameter VMT dengan aplikasi elemen hingga 2D

Pemodelan parameter VMT dapat dilakukan melalui beberapa langkah berikut:

- 1) Input parameter material tanah berdasarkan jenis lapisan tanah pada Tabel 1 dan parameter material tiang pancang pada Tabel 2 (lanjutan). Data tanah (model material Mohr-Coulomb)

Parameter	Kedalaman (m)			
	0-9	9-11,55	11,55-15	15-30
<i>Drainage Type</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	17	17	21
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	22	18	20	22
$E'$ (kN/m <sup>2</sup> )	93.278	18.090	50.366	67.200
$\nu'$	0,3	0,2	0,25	0,3
$E_{\text{od}}$ (kN/m <sup>2</sup> )	125.566,27	20.100	60.439,37	90.461,54

c' (kN/m <sup>2</sup> )	-	18	-	-
G (kN/m <sup>2</sup> )	35.876,08	7.537,5	20.146,46	25.846,16
φ' (°)	38	14	38	41
V <sub>s</sub> (m/s)	129,4575	65,9514	107,8225	109,8811
V <sub>p</sub> (m/s)	242,1929	107,6981	186,7540	205,5686
R <sub>inter</sub>	1	0,5	1	1
K <sub>0</sub> (m/s)	0,3912	1	0,3912	0,3439

- 2) Tabel 3 ke dalam aplikasi. Untuk tanah digunakan model material Mohr-Coulomb karena merupakan model material yang paling sederhana sedangkan untuk tiang pancang digunakan model material Linear Elastic karena merupakan salah satu struktur yang memiliki kekuatan tinggi dalam tanah. Kecepatan gelombang transversal (V<sub>s</sub>) dan kecepatan gelombang longitudinal (V<sub>p</sub>) dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 dan 6.

Tabel 1. Data tanah (model material Mohr-Coulomb)

Parameter	Kedalaman (m)			
	0-9	9-11,55	11,55-15	15-30
Klasifikasi Tanah	Pasir	Lempung	Pasir	Pasir
Konsistensi	<i>Dense to very dense</i>	<i>Medium stiff to stiff</i>	<i>Medium dense to dense</i>	<i>Very dense</i>

Tabel 2 (lanjutan). Data tanah (model material Mohr-Coulomb)

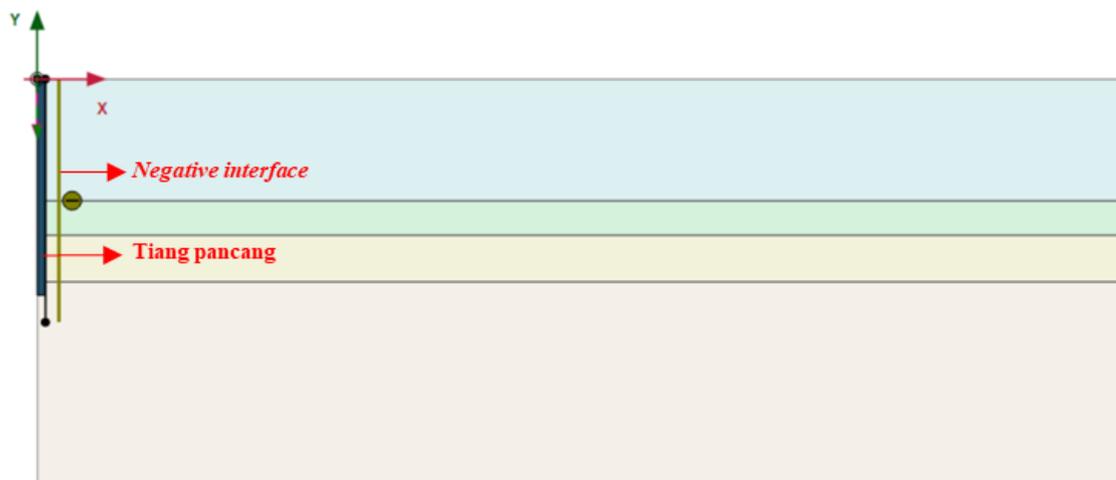
Parameter	Kedalaman (m)			
	0-9	9-11,55	11,55-15	15-30
<i>Drainage Type</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>	<i>Undrained (A)</i>
γ <sub>unsat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	21	17	17	21
γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	22	18	20	22
E' (kN/m <sup>2</sup> )	93.278	18.090	50.366	67.200
v'	0,3	0,2	0,25	0,3
E <sub>od</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	125.566,27	20.100	60.439,37	90.461,54
c' (kN/m <sup>2</sup> )	-	18	-	-
G (kN/m <sup>2</sup> )	35.876,08	7.537,5	20.146,46	25.846,16
φ' (°)	38	14	38	41
V <sub>s</sub> (m/s)	129,4575	65,9514	107,8225	109,8811
V <sub>p</sub> (m/s)	242,1929	107,6981	186,7540	205,5686
R <sub>inter</sub>	1	0,5	1	1
K <sub>0</sub> (m/s)	0,3912	1	0,3912	0,3439

Tabel 3. Data material tiang pancang (model material *Linear Elastic*)

Parameter	Nilai
Identifikasi	<i>Pile</i>
Model material	<i>Liner elastic</i>
<i>Drainage Type</i>	<i>Non-porous</i>
γ <sub>unsat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	24

$e_0$	0,5
$f'_c$ (MPa)	52
$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	33.892.182
$\nu'$	0,1
$G$ (kN/m <sup>2</sup> )	15.405.537,27
$E_{od}$ (kN/m <sup>2</sup> )	34.662.458,85

- 3) Gambar geometri tanah dan struktur tiang pancang menggunakan *polygon* dengan panjang 16 m dan diameter tiang 0,3 m ( $1/2$  dari diameter tiang asli yaitu 0,6 m) karena pada tipe struktur *axisymmetry* struktur hanya digambarkan dengan potongan dari titik sumbu sampai tepi. Kemudian, buatlah *negative interface* untuk memodelkan interaksi antara selimut tiang dengan tanah di sekelilingnya seperti pada Gambar 11. Masukkan juga material tanah dan tiang pancang ke dalam masing-masing struktur.
- 4) *Input* beban dinamik menggunakan hasil dari uji PDA (*Pile Driving Analyzer*) di lapangan berupa *displacement* (perpindahan) yang telah disimplifikasi nilainya ke dalam Tabel 4.
- 5) Buat beberapa tahapan untuk proses kalkulasi meliputi:
  - Tahap awal (*initial phase*)  
 Pada tahap ini, hanya terdapat geometri tanah termasuk jenis tanah yang telah dimodelkan ke dalam klaster-klaster yang tepat dengan Muka Air Tanah (M.A.T) dimodelkan pada kedalaman 6,85 m.
  - Tahap 1: Aktivasi tiang pancang (*Pile activation*)  
 Pada tahap ini, telah terdapat struktur tiang pancang tanpa beban apapun.
  - Tahap 2: Pemancangan tiang (*pile driving*)  
 Pada tahap ini, beban dinamik pada tiang sudah bekerja akibat proses pemancangan dengan rentang waktu 0,01 s.
  - Tahap 3: *Fading*  
 Pada tahap ini, beban dinamik di nonaktifkan tetapi efek dinamikanya (rambatan gelombang) masih ada hingga berangsur-angsur memudar dalam rentang waktu 1 s.



Gambar 11. Pemodelan tiang pancang

Tabel 4. Beban dinamik waktu (t) vs. perpindahan (S)

t (s)	S (m)
0	0
0,00512	0
0,01024	0,015
0,01536	0,0135
0,02048	0,009

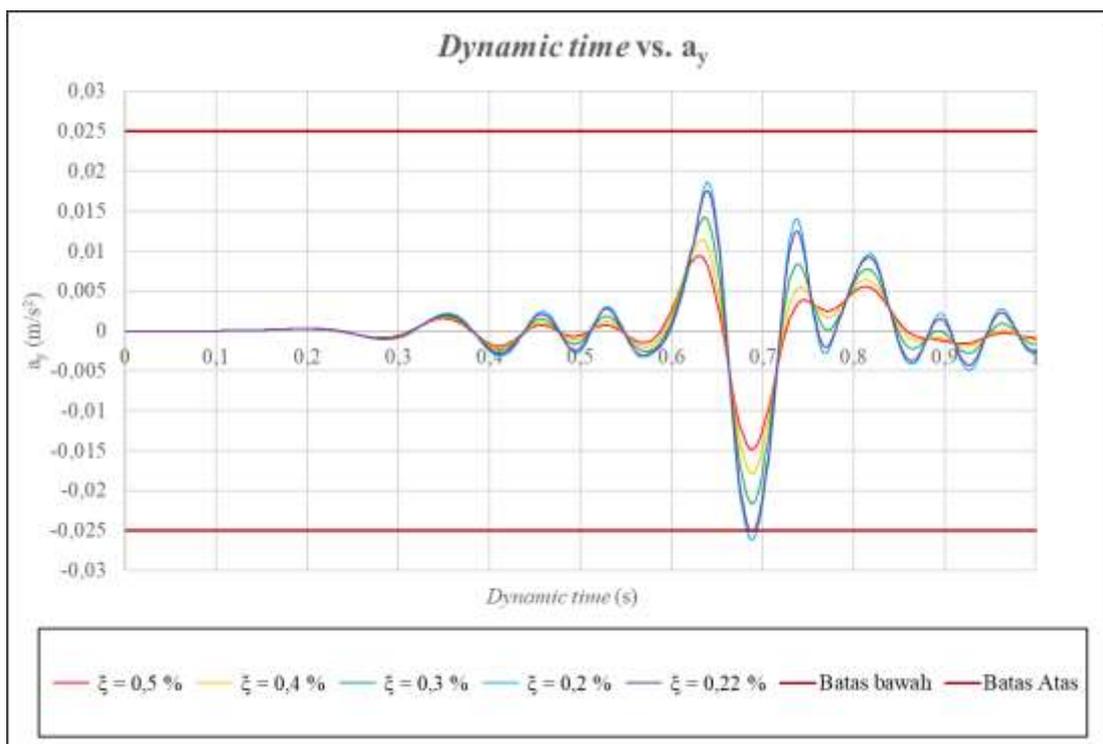
0,0256    0,0059  
0,04608    0,006

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

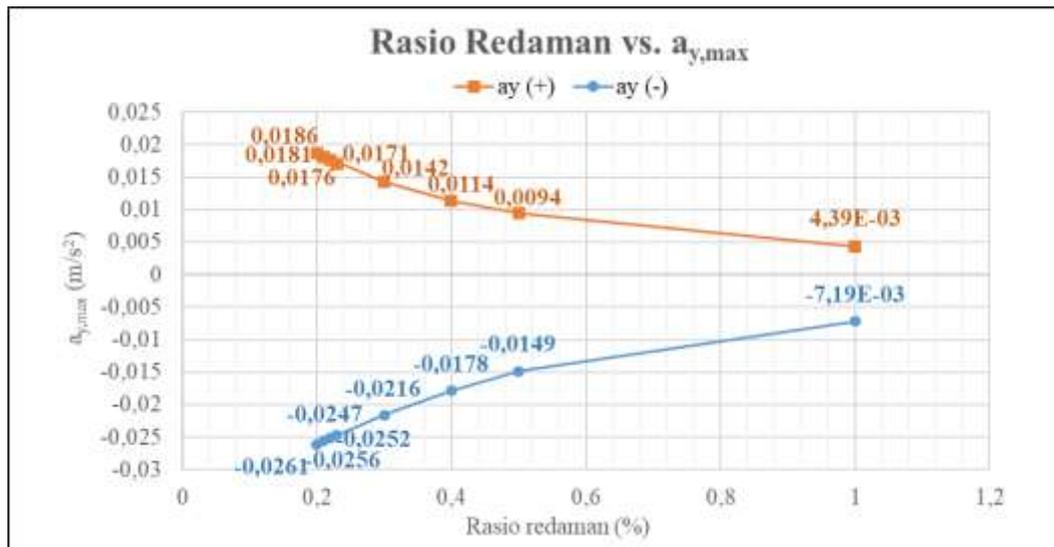
Setelah memodelkan struktur dan proses pemancangan tiang pancang, dilakukan pemodelan parameter VMT pada aplikasi elemen hingga melalui proses iterasi yang dimaksudkan untuk mencari nilai rasio redaman ( $\xi$ ) yang dapat memodelkan parameter getaran paling mendekati dari data VMT di lapangan ke dalam aplikasi elemen hingga. Parameter VMT yang digunakan dalam pemodelan ini berupa percepatan vertikal ( $a_y$ ) pada jarak 80 m dari sumber getaran yang diakibatkan oleh pemancangan tiang fondasi sebesar  $a_y = \pm 0,025 \text{ m/s}^2$ . Prinsip iterasi sendiri yaitu mengulang suatu perhitungan hingga hasilnya mendekati seperti yang telah direncanakan. Dari iterasi beberapa nilai rasio redaman, dihasilkan grafik berupa *dynamic time* vs. percepatan arah y yang dapat dilihat melalui Gambar 12.

Dari grafik pada Gambar 12, jika diambil contoh grafik pada nilai  $\xi = 0,22 \%$  dapat dilihat pada waktu sekitar 0,3 s terjadi gelombang longitudinal (P-Wave) yang arah rambatnya berimpit dengan arah getarnya sehingga nilai percepatannya sangat kecil dan setelah itu terjadi gelombang transversal (S-Wave) yang arah rambatnya tegak lurus dengan arah getarnya sehingga nilai percepatannya lebih besar daripada gelombang P. Dapat dilihat juga bahwa dalam batas waktu 1 s, gelombang P terjadi dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan gelombang S. Sehingga, memungkinkan bahwa gelombang S memiliki potensi untuk menimbulkan kerusakan struktur yang lebih besar.

Jika dari grafik pada Gambar 12 diambil nilai maksimumnya dan kemudian nilainya di plot ke dalam grafik pada Gambar 13, dapat disimpulkan bahwa semakin besar rasio redaman, maka percepatan akan semakin kecil. Penjelasan sederhananya yaitu jika suatu gelombang merambat pada tanah yang memiliki banyak rongga, jalan gelombang tersebut terhalang oleh butiran tanah yang dapat membuat jarak dan waktu tempuh percepatan tanah menjadi berkurang.



Gambar 12. Grafik *dynamic time* vs.  $a_y$  hasil iterasi rasio redaman



Gambar 13. Grafik rasio redaman vs.  $a_{y,max}$

Hasil proses iterasi nilai rasio redaman dapat dirangkum ke dalam Tabel 5.

Tabel 5 Hasil proses iterasi nilai rasio redaman ( $\xi$ )

Redaman	Percepatan		% perbedaan terhadap $a_{y,target} = 0,025 \text{ m/s}^2$	
	$a_{y(+)} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{y(-)} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{y(+)}$	$a_{y(-)}$
$\xi$ (%)				
1	4,39E-03	-7,19E-03	82,42	71,26
0,5	0,0094	-0,0149	62,29	40,58
0,4	0,0114	-0,0178	54,33	28,63

Tabel 6 (lanjutan). Hasil proses iterasi nilai rasio redaman ( $\xi$ )

Redaman	Percepatan		% perbedaan terhadap $a_{y,target} = 0,025 \text{ m/s}^2$	
	$a_{y(+)} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{y(-)} \text{ (m/s}^2\text{)}$	$a_{y(+)}$	$a_{y(-)}$
$\xi$ (%)				
0,3	0,0142	-0,0216	43,03	13,56
0,2	0,0186	-0,0261	25,52	4,43
0,21	0,0181	-0,0256	27,72	2,48
<b>0,22</b>	0,0176	<b>-0,0252</b>	29,72	<b>0,66</b>
0,23	0,0171	-0,0247	31,62	1,24

Berdasarkan Tabel 5, proses iterasi dimulai dari nilai rasio redaman awal sebesar 1 % untuk mengantisipasi masalah numerik. Tetapi dikarenakan hasil nilai percepatan masih sangat kecil yaitu  $4,39 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  dan  $-7,19 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ , pada langkah selanjutnya dicoba menggunakan nilai rasio redaman sebesar 0,5 % dan menghasilkan nilai percepatan yang cukup mendekati yaitu  $0,0094 \text{ m/s}^2$  dan  $-0,0149 \text{ m/s}^2$ . Langkah seterusnya dilakukan dengan nilai redaman yang lebih kecil lagi hingga salah satu nilai  $a_y$  baik positif maupun negatif mendekati  $\pm 0,025 \text{ m/s}^2$ .

Proses iterasi berhenti dilakukan pada nilai rasio redaman sebesar 0,23 % dengan hasil nilai percepatan  $0,0171 \text{ m/s}^2$  dan  $-0,0247 \text{ m/s}^2$ , kemudian dibandingkan dengan hasil nilai percepatan dari rasio redaman 0,22 % yaitu  $0,017 \text{ m/s}^2$  dan  $-0,0252 \text{ m/s}^2$ . Kesimpulan akhir dipilih nilai rasio redaman sebesar 0,22 % untuk pemodelan parameter dinamik karena nilai  $a_y = -0,025 \text{ m/s}^2$  paling mendekati nilai percepatan parameter VMT yaitu  $a_y = \pm 0,025 \text{ m/s}^2$  presentase perbedaan 0,66 %.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

## Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- 1) Waktu kedatangan gelombang longitudinal (P-Wave) lebih cepat dan amplitudo percepatannya lebih kecil jika dibandingkan dengan gelombang transversal (S-Wave) yang datang setelahnya dengan amplitudo getaran yang lebih besar sehingga berpotensi untuk menimbulkan kerusakan struktur yang lebih besar.
- 2) Dari hasil iterasi nilai rasio redaman hingga mendapatkan nilai percepatan yang sesuai atau mendekati parameter VMT, digunakan nilai rasio redaman sebesar  $\xi = 0,22\%$  untuk pemodelan parameter VMT pada aplikasi elemen hingga karena memiliki presentase perbedaan dengan ay, target paling kecil yaitu sebesar 0,66 %.
- 3) Semakin kecil nilai rasio redaman pada tanah, maka nilai amplitudo percepatan getaran tanah akan semakin besar.

## Saran

Saran yang dapat penulis berikan sebagai penelitian lanjutan dari penelitian ini di antaranya:

- 1) Parameter VMT yang dimodelkan pada aplikasi elemen hingga 2D dapat dilakukan lebih lengkap lagi mulai dari parameter kecepatan, perpindahan, dan percepatan. Cara lain, dapat juga dilakukan pemodelan percepatan dari beberapa titik yang berbeda dari sumber getaran sehingga didapatkan hasil parameter tanah dinamik yang lebih akurat sesuai kondisi nyata di lapangan.
- 2) Dilakukan pemodelan struktur pada area di sekitar pemancangan tiang untuk mengetahui bagaimana dampak kerusakan yang ditimbulkan dari besar getaran tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bentley. (2022). *PLAXIS Connect Edition V22.01*. Bentley Communities.
- Brinkgreve, R. B. J. & Broere, W. (2006). *PLAXIS 3D Foundation*. Delft University of Technology & PLAXIS bv.
- Devianta, R. (2013). *Fisika Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*. Putra Nugraha.
- Elnashai, A. S. & Sarno, L. D. (2008). *Fundamentals of Earthquake Engineering*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Head, J. M. & Jardine, F. M. (1992). *Ground-Borne Vibrations Arising from Piling*. Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).
- Koven, W. (2014). *Pemodelan Potensi Hydraulic Fracture pada Saat Pengisian Waduk Pertama Bendungan Rockfill* [Diploma thesis, Universitas Komputer Indonesia]. <http://repository.unikom.ac.id/id/eprint/28552>
- Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis*. ICE Publishing.
- Logan, D. L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method* (edisi ke 5). Cengage Learning.
- Ramshaw, C. L. (2002). *Computation of Ground Waves from Pile Driving and Their Effect on Structures* [Disertasi doktor, Durham University]. <http://etheses.dur.ac.uk/3762/>
- Suhairy, S. A. (2000). *Prediction of Ground Vibration from Railways*. SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Vesic, A. S. (1977). *Design of Pile Foundation*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences.

