



TUGAS AKHIR - SF 141501

**IDENTIFIKASI BAWAH PERMUKAAN TANGGUL
LUMPUR SIDOARJO (LUSI) MENGGUNAKAN
METODE *MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE
WAVE (MASW)***

**Yoseph Wahyu Saputra Wisnu Wardana
NRP 1111.100.050**

**Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer-nat Bagus Jaya Santosa, S.U
Sungkono, M.Si**

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - SF 141501

**SUBSURFACE IDENTIFICATION OF LUMPUR
SIDOARJO (LUSI) EMBANKMENT USING
MULTICHANNEL ANALYSIS SURFACE WAVES
(MASW)**

**Yoseph Wahyu Saputra Wisnu Wardana
NRP.1111.100.050**

**Advisor Lecturer
Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U
Sungkono, M.Si**

**Physics Department
Faculty of Mathematics and Sciences
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

LEMBAR PENGESAHAN

**IDENTIFIKASI BAWAH PERMUKAAN TANGGUL
LUMPUR SIDOARJO (LUSI) MENGGUNAKAN
METODE *MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE
WAVE (MASW)***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Pada Bidang Geofisika
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun Oleh :

Yoseph Wahyu Saputra Wisnu Wardana
NRP. 1111.100.050

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U (.....)

Sungkono, M.Si (.....)

Surabaya, Juni 2016

LEMBAR PENGESAHAN

**IDENTIFIKASI BAWAH PERMUKAAN TANGGUL
LUMPUR SIDOARJO (LUSI) MENGGUNAKAN
METODE *MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE
WAVE (MASW)***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Sains Pada Bidang Geofisika
Program Studi S-1 Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun Oleh :

Yoseph Wahyu Saputra Wisnu Wardana
NRP. 1111.100.050

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir

Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U. (.....)

Sungkono, M.Si (.....)



Surabaya, Juni 2016

**IDENTIFIKASI BAWAH PERMUKAAN TANGGUL
LUMPUR SIDOARJO (LUSI) MENGGUNAKAN
METODE *MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE
WAVES (MASW)***

Nama : Yoseph Wahyu Saputra W. W.
NRP : 1111 100 050
Jurusan : Fisika FMIPA ITS
Dosen Pembimbing : Prof.Dr.rer-nat Bagus Jaya Santosa,S.U
Sungkono, M.Si

Abstrak

Metode pengukuran dan analisis multichannel analysis of surface wave (MASW) mampu digunakan untuk estimasi kurva dispersi mode jamak. Metode ini diterapkan untuk mengetahui kecepatan gelombang geser bawah permukaan tanggul LUSI melalui proses inversi. Proses inversi ini dilakukan menggunakan algoritma regressive-regressive particle swarm optimization (RR-PSO). Analisis mode dasar dari kurva dispersi pada beberapa lintasan di tanggul LUSI menunjukkan bahwa pada tanggul P76-P77 ditemukan anomali Patahan Watukosek pada kedalaman sekitar 40 meter, dan juga pada tanggul P79-P82 ditemukan anomali yang memiliki potensi untuk menyebabkan penurunan tanah.

Kata kunci: Dispersi gelombang rayleigh, MASW, LUSI

**SUBSURFACE IDENTIFICATION OF LUSI
EMBANKMENT USING MULTICHANNEL
ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW)
METHOD**

Name : Yoseph Wahyu Saputra W. W.
NRP : 1111 100 050
Department : Fisika FMIPA ITS
Advisor Lecturer : Prof. Dr. rer-nat Bagus Jaya Santosa, S.U
Sungkono, M.Si

Abstract

The method and analysis of multichannel analysis of surface wave (MASW) is able to estimate the dispersion curves. This method is applied to determine the shear wave velocity of subsurface embankment LUSI through an inversion process. This inversion process is using an algorithm regressive-regressive particle swarm optimization (RR-PSO). Analysis of the basic mode of the dispersion curve on some path on the LUSI embankment show that in P76-P77 found anomalies Watukosek Fault at a depth of about 40 meters, and also on the embankment P79-P82 found anomalies which have the potential for causing subsidence.

Keywords: Rayleigh wave dispersion, MASW, LUSI

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah/ Ruang Lingkup Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II. LANDASAN TEORI	
2.1 Kondisi Geologi LUSI	7
2.2 Gelombang Rayleigh	8
2.2.1 Vektor Tegangan dan Perpindahan	9
2.2.2 Gelombang Bidang Model Berlapis	11
2.2.3 Dispersi Gelombang Rayleigh	13
2.3 <i>Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)</i>	16
2.4 Pemodelan Geofisika	18
2.4.1 <i>Inversi RR-PSO</i>	19
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Alur Penelitian	23

BAB IV. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisa Data Kurva Dispersi	27
4.2 Analisa Hasil Inversi	28
4.3 Interpretasi Hasil Inversi	32
4.3.1 Tanggul P76 – P77	32
4.3.2 Tanggul P78 – P79	34
4.3.3 Tanggul P79 – P82	34
4.3.4 Tanggul P83 – P84	36
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	43
BIODATA PENULIS	61

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	<i>Search space</i> yang digunakan pada inversi	29
Tabel 4.2	Nilai Kecepatan Gelombang Geser pada Material	29

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta Daerah Terdampak	1
Gambar 2.1	Citra satelit kondisi geologi sekitar semburan	8
Gambar 2.2	Perambatan dan pergerakan partikel Gelombang Rayleigh	9
Gambar 2.3	Model bumi berlapis dengan nilai parameter elastisitas disetiap lapisan	12
Gambar 2.4	Trace Gelombang Rayleigh pada saat keadaan non-dispersif dan pada keadaan dispersif	14
Gambar 2.5	Geometri dispersi Gelombang Rayleigh	15
Gambar 2.6	Contoh kurva dispersi Gelombang Rayleigh dengan normal dispersi	15
Gambar 2.7	Tahapan dalam metode MASW untuk mendapatkan kurva dispersi	18
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 3.2	Diagram Alir Algoritma RR-PSO	25
Gambar 4.1	Contoh data lapangan pada tanggul P76-P77	27
Gambar 4.2	Contoh kurva dispersi pada tanggul P76-P77	28
Gambar 4.3	Model Kecepatan Gelombang Geser Vs satu dimensi	31
Gambar 4.4	Nilai error hasil dari proses inversi	31
Gambar 4.5	Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P76-P77	32
Gambar 4.6	Peta Geologi Daerah sekitar LUSI	33
Gambar 4.7	Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P78-P79	34
Gambar 4.8	Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P79-P82	35
Gambar 4.9	Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P83-P84	36

DAFTAR LAMPIRAN

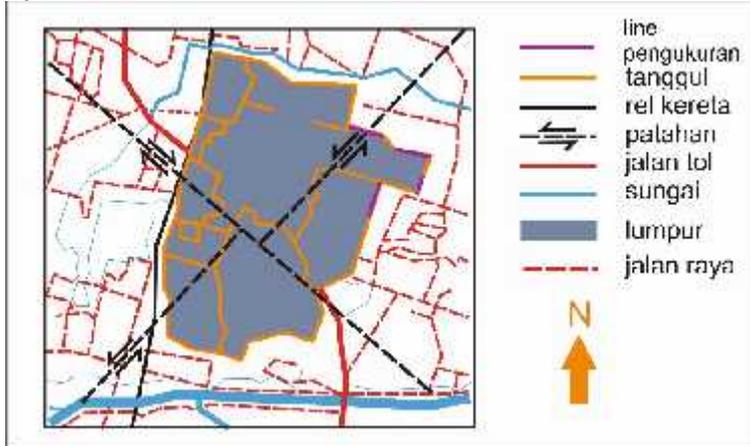
Lampiran A	Hasil Inversi tiap Tanggul	43
------------	----------------------------	----

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lumpur Sidoarjo merupakan bencana nasional yang sangat mengemparkan dunia. Bencana ini terjadi di Dusun Balongnongo, Desa Renokenongo, Kecamatan Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Semburan ini mulai terjadi semenjak tanggal 29 Mei 2006, dan bahkan sampai sekarang masih aktif menyemburkan lumpur setiap harinya. Berbagai upaya telah dilakukan oleh Pemerintah Pusat untuk menghentikan dan menanggulangi bencana ini. Salah satunya adalah dengan membangun tanggul yang mengelilingi pusat semburan untuk mencegah melubernya lumpur yang keluar, serta membentuk suatu badan independen yang bertugas untuk mengawasi dan menanggulangi apabila ada kejadian yang tidak diinginkan di daerah sekitar semburan yaitu Badan Penanggulangan Lumpur Sidoarjo (BPLS).



Gambar 1.1 Peta Daerah Terdampak (Sukardi,1992)

Karena tanggul memiliki peran penting dalam penanggulangan bencana ini, perlu dilakukan *monitoring* untuk mengevaluasi kelayakannya. Pengawasan ini juga bisa digunakan

untuk mencegah apabila adanya potensi kebocoran tanggul, sehingga dapat meminimalisir bertambahnya korban. Metode-metode geofisika dapat digunakan untuk investigasi struktur bawah permukaan dangkal, dalam hal ini tanggul. Salah satu metode yang populer adalah dengan menggunakan gelombang permukaan.

Metode gelombang permukaan berkembang sangat pesat pada studi geoteknikal dan geofisika untuk karakterisasi struktur bawah permukaan dangkal. Kurva ini memiliki informasi berupa kecepatan gelombang geser, ketebalan lapisan, densitas dan kecepatan gelombang kompresi pada setiap lapisannya. (Xia et al., 1999). Analisis kurva dispersi ini merupakan metode yang sangat cepat dan efektif untuk merekonstruksi kecepatan gelombang geser (Foti et al., 2009).

Pada penelitian ini digunakan metode MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) untuk analisa Kurva Dispersi. Menurut Park *et al.* (2007), MASW dapat dilakukan dengan 3 tahapan yaitu, akuisisi *multichannel* data (dalam penelitian ini digunakan 12 *channel*), menentukan kurva dispersi pada setiap pengukuran dan yang terakhir adalah menginversi kurva dispersi tersebut untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser 1D. Dari profil kecepatan gelombang geser ini, dapat diketahui kondisi struktur bawah permukaan tanggul.

Dalam mengkarakterisasi kondisi bawah permukaan, digunakan model dan parameter yang didapatkan dari estimasi data lapangan (Grandis, 2009). Data lapangan yang didapatkan dari pengukuran, tidak serta merta dapat menggambarkan kondisi geologi bawah permukaan. Maka dilakukanlah pemodelan untuk mengetahui kondisi geologi tersebut yang biasa disebut pemodelan inversi. Dalam pemodelan inversi parameter diperoleh langsung dari data lapangan, lalu dibuat model berdasarkan parameter yang telah diketahui. Dalam proses inversi ini dilakukan modifikasi model agar diperoleh kecocokan (*fitting data*) antara data perhitungan dengan data lapangan.

Metode inversi dibedakan menjadi beberapa kelompok berdasarkan pendekatannya. Untuk metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah metode non-linier dengan pendekatan global. Alasan mengapa menggunakan pendekatan global adalah untuk menghindari hasil inversi yang kurang baik akibat dari kesalahan dalam tebakan awal. Karena pada metode pendekatan lokal diwajibkan memberikan tebakan awal yang mendekati solusi akhir agar proses inversi berjalan dengan baik. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan banyak parameter, sehingga pada proses inversinya akan digunakan metode inversi non-linier dengan pendekatan global.

Baru-baru ini banyak dikembangkan berbagai macam pengembangan PSO. Dan dari berbagai macam jenis PSO ini, RR-PSO (*Regressive-regressive Particle Swarm Optimization*) yang memiliki nilai konvergensi tertinggi (Fernández-Martínez and García Gonzalo, 2012). Dan menurut Arung Laby (2016), RR-PSO ini memiliki performa yang baik dalam menginversi kurva dispersi gelombang Rayleigh dan juga dilengkapi dengan posterior distribusi model (PDM). PDM ini digunakan untuk mengestimasi ketidakpastian parameter model. Sehingga pada penelitian ini akan digunakan metode RR-PSO untuk proses inversinya.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana cara mengekstrak dispersi gelombang Rayleigh ?
2. Bagaimana mengkarakterisasi lapisan bawah permukaan tanggul dengan menggunakan metode MASW ?
3. Bagaimana keadaan lapisan bawah tanah tanggul Lumpur Sidoarjo ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Tempat yang digunakan dalam studi ini adalah Tanggul lumpur Sidoarjo titik P76-P77, P78-P79, P79-P82 dan P83-P84
2. Algoritma yang digunakan dalam proses inversinya adalah *Regressive-Regressive Particle Swarm Optimization (RR-PSO)*
3. Metode pengambilan data yang digunakan adalah *Multi Analysis of Surface Waves* aktif..

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui cara mengekstrak dispersi gelombang Rayleigh.
2. Untuk menganalisis lapisan bawah permukaan dengan menggunakan metode MASW .
3. Untuk mengetahui keadaan bawah tanah pada tanggul Lumpur Sidoarjo

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah didapat informasi berupa keadaan bawah permukaan tanggul Lumpur Sidoarjo, untuk kepentingan mitigasi. Penelitian ini juga akan menunjukkan hasil analisis dari metode MASW sendiri, sehingga kedepannya metode ini dapat dikembangkan lebih baik lagi.

1.6 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dapat diuraikan sebagai berikut:

Bab I – Pendahuluan, berisi uraian mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan laporan penelitian.

Bab II – Tinjauan Pustaka, berisi uraian mengenai teori yang mendukung analisis.

Bab III – Metodologi Penelitian, uraian mengenai mengenai metode-metode dan tahapan-tahapan yang dilakukan selama penelitian.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

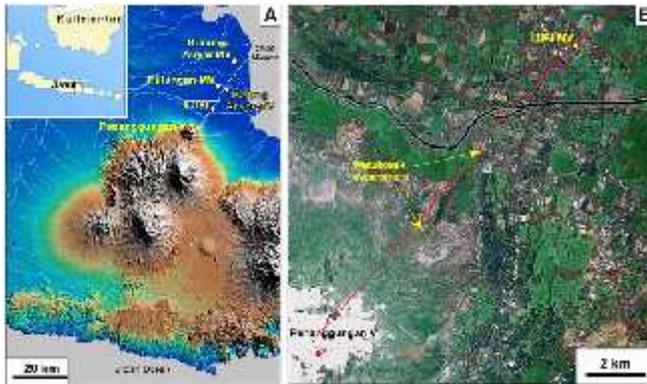
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Kondisi Geologi LUSI

Pulau Jawa, seperti pulau-pulau lainnya di Indonesia, merupakan hasil dari Subduksi aktif lempeng samudera. Pada bagian selatan umumnya terdiri dari prisma akresi yang terendam dan busur vulkanik. Sedangkan pada bagian utara dari Jawa Timur terbentuk dari cekungan dan memiliki tingkat sedimentasi yang tinggi. (Willumsen dan Schiller,1994;. Schiller et al., 1994). LUSI terdapat pada 10km timur laut dari Gunung Penanggungan. Profil seismik regional dan observasi lapangan menunjukkan adanya patahan melewati daerah LUSI meskipun pada bagian ini tertimbun sedimen aluvial. Beberapa gunung lumpur berada di dekat semburan LUSI ditunjukkan pada Gambar 2.1, namun aktifitas tentang erupsi tidak didokumentasikan.

Stratigrafi Kota Sidoarjo terdiri dari 1) Sedimen Aluvial; 2) Batu Pasir *Pleistocene* dan *shale* dari Formasi Pucangan (hingga kedalaman 900 m), 3) Lempung *Pleistocene* yang berwarna abu kebiruan dari Formasi Kalibeng hingga kedalaman 1871 m dan 4) Pasir Gunung Api hingga kedalaman 962 m. Sumur Porong 1 yang berada pada 6,5 km timur-laut Sidoarjo, menunjukkan bahwa sedimen *Plio-Pleistocene* berada pada atas lapisan kapur *Miocene*. Adanya kandungan isotop Strontium mengindikasikan bahwa terbentuk pada tahun 16 Masehi. (Mazini, 2007)



Gambar 2.1 Citra satelit kondisi geologi sekitar semburan (Mazini, 2007)

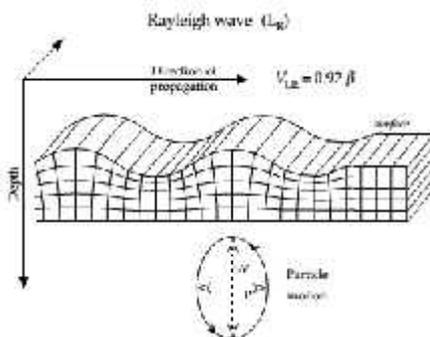
Secara umum ada 2 tipe tanggul berdasarkan material penyusunnya. Tipe pertama adalah *earthfill* dan yang kedua adalah *rockfill*. Kedua tipe tanggul ini dibedakan dari material penyusunnya. Untuk tipe tanggul *earthfill* tersusun dari material yang diambil langsung dari lingkungan sekitar pembangunan tanggul. Sedangkan untuk tipe *rockfill* tersusun dari batu untuk bagian inti dan pondasinya, lalu ditutupi dengan material disekitar tanggul.

Tanggul LUSI ini sendiri adalah tipe *earthfill* karena dibangun menggunakan material disekitar semburan. Tipe tanggul ini memiliki keunggulan yakni lebih tahan terhadap kebocoran, memiliki stabilitas yang baik terhadap gempa bumi, dan mudah dalam hal *monitoring* juga perbaikan jika ada rembesan.

2.2 Gelombang Rayleigh

Jenis gelombang ini pertama kali diperkenalkan oleh Lord Rayleigh pada tahun 1885. Gelombang ini merupakan kombinasi dari gelombang P dan SV. Gelombang ini memiliki kecepatan sekitar 0,919 dari kecepatan gelombang S (Lowrie, 2007). Perpaduan antara gelombang P dan SV ini memiliki perbedaan fase sebesar 90° , hal ini lah yang menyebabkan gerakan partikel dari penjalaran gelombang Rayleigh berbentuk elips. Pergerakan

komponen vertikalnya lebih besar daripada komponen horizontalnya dengan faktor perbedaan 1,5. Ketika berada di dekat permukaan pergerakan partikelnya akan berlawanan dengan arah perambatan (*retrograde*). Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.2, pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa arah pergerakan gelombang Rayleigh searah dengan gelombang P. Namun pada *wavefront* (Gambar 2.2 bagian bawah) terlihat jika arah pergerakannya berlawanan dengan arah perambatan. Keadaan ini tidak berlaku pada kedalaman yang lebih dalam, karena gerakan partikelnya akan searah dengan arah perambatan (Lay et al., 1995). Perpindahan partikel yang disebabkan oleh perambatan gelombang Rayleigh ini tidak hanya berpengaruh pada partikel yang ada pada permukaan saja, namun juga berpengaruh pada partikel yang berada dibawah permukaan. Namun efek ini akan menurun seiring bertambah dalamnya perambatan gelombang ini. (Lowrie, 2007)



Gambar 2.2 Perambatan dan pergerakan partikel Gelombang Rayleigh (Lowrie, 2007)

2.2.1 Vektor Tegangan dan Perpindahan

Perambatan gelombang Rayleigh pada medium homogen, isotropik tidak bergantung frekuensi dan memiliki kecepatan sebesar 0,919 dari V_s . Namun pada medium vertikal non-

homogen, gelombang Rayleigh akan mengalami dispersi. Sehingga kecepatannya akan bergantung pada kedalaman atau z .

Aki dan Richards (1980) memaparkan bahwa gelombang permukaan (u) menjalar secara horizontal dalam arah sumbu x , memiliki frekuensi sudut (ω) dan bilangan gelombang (k) dapat dituliskan dengan Persamaan (2.1)

$$u(x, y, z, t) = Z(z)e^{i(kx - \omega t)} \quad (2.1)$$

dengan z adalah kedalaman, $Z(z)$ merupakan amplitudo yang nantinya akan melemah seiring bertambahnya kedalaman.

Untuk penjalaran gelombang Rayleigh yang merupakan gabungan antara gelombang P dan SV, memiliki solusi penjalaran pada permukaan bebas sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2.2)

$$\bar{u}: \{u_1 = x_1(z, k, \omega) \cdot e^{i(kx - \omega t)}, u_2 = 0, u_3 = i \cdot x_3(z, k, \omega) \cdot e^{i(kx - \omega t)}\} \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) menunjukkan adanya perbedaan fase antara komponen horizontal dan vertikal pada penjalaran gelombang Rayleigh. Perbedaan fase ini sebesar $\frac{\pi}{2}$.

Solusi penjalaran gelombang Rayleigh ini harus disertai dengan dengan syarat batas pada keadaan permukaan bebas (*free surface*). Ada 2 syarat batas yang harus terpenuhi pada keadaan *free surface* ini. Pertama adalah pada medium bebas (permukaan), tegangan bernilai nol dan pada kedalaman yang tak terbatas tegangan dan perpindahan bernilai nol pula. Syarat ini ditunjukkan pada Persamaan (2.3).

$$\begin{aligned} \sigma(x, y) \cdot \bar{n} &= 0 \text{ pada } z = 0 \\ \bar{u}(x, y) &\rightarrow 0, \sigma(x, y) \cdot \bar{n} = 0 \text{ pada } z \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (2.3)$$

dengan $\sigma(x, y)$ dan \bar{n} adalah tensor tegangan Cauchy dan vektor normal. Namun pada medium yang berlapis akan berlaku pada Persamaan (2.4)

$$\begin{aligned} u(x, z^+) &= \bar{u}(x, z^-) \\ \sigma(x, z^+) \cdot \check{n} &= \sigma(x, z^-) \cdot \check{n} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) disubstitusikan pada Persamaan Navier, akan membentuk Persamaan (2.5)

$$\mu \nabla^2 \bar{u} + (\lambda + \mu) \frac{d(\nabla \bar{u})}{dz} + e_z \frac{d}{dz} \nabla \cdot \bar{u} + \frac{d}{dz} (e_z \times \nabla \times \bar{u} + 2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}) = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Setelah syarat batas pada Persamaan (2.4) diaplikasikan pada Persamaan Navier (2.5), maka akan menjadi Persamaan (2.6)

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k & \frac{1}{\mu(z)} & 0 \\ \frac{-k(z)}{\lambda(z)+2\mu(z)} & 0 & 0 & \frac{1}{\lambda(z)+2\mu(z)} \\ k^2 \xi(z) - \omega^2 \rho(z) & 0 & 0 & \frac{k(z)}{\lambda(z)+2\mu(z)} \\ 0 & -\omega^2 \rho(z) & -k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

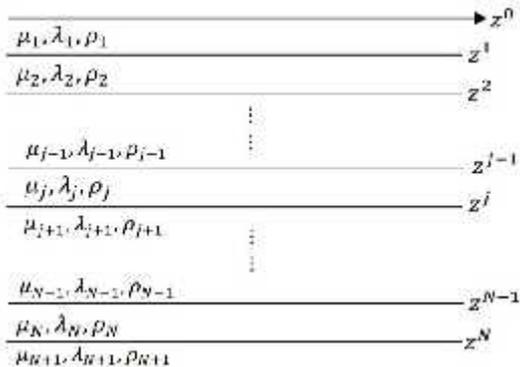
Dengan $\xi(z) = \frac{4\mu(z)(\lambda(z)+\mu(z))}{\lambda(z)+2\mu(z)}$, dan parameter $\lambda(z)$, $\mu(z)$ serta $\rho(z)$ bersifat tidak kontinu pada perbatasan antar medium yang berlapis.

Vektor perpindahan untuk gelombang P dan SV didefinisikan oleh $f(z) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ "T" pada persamaan ini adalah transpose dari matriks $G(z)$ yang berukuran 4 x 4, sehingga dapat dituliskan menjadi Persamaan (2.7)

$$\frac{d}{dz} f(z) = G(z) f(z) \quad (2.7)$$

2.2.2 Gelombang Bidang Model Berlapis

Ketika gelombang Rayleigh merambat pada medium berlapis, isotropik setengah ruang ($z > 0$), maka perambatannya akan dipengaruhi oleh parameter elastis μ_1 , λ_1 dan ρ_1 . Ketiga parameter ini sangat bergantung pada kedalaman dari suatu lapisan tersebut, dan dapat digambarkan dengan Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Model bumi berlapis dengan nilai parameter elastisitas di setiap lapisan (Sungkono, 2011)

Aki dan Richards (2002) memberikan solusi untuk tiap lapisan seperti Persamaan (2.8)

$$f^j(z) = A^j B^j D^j \quad j = 1, 2, 3, \dots, N, N + 1 \quad (2.8)$$

Dengan A^j dan B^j adalah matriks yang diketahui, sedangkan D^j adalah vektor yang akan diestimasi sebagai mana Persamaan (2.9)

$$A^j B^j D^j = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} a^j k & \beta^j v^j & a^j k & \beta^j v^j \\ a^j y^j & \beta^j k & -a^j y^j & -\beta^j k \\ -2a^j \mu^j k y^j & -\beta^j \chi^j \mu^j & a^j 2\mu^j k y^j & \beta^j \chi^j \mu^j \\ -a^j \chi^j \mu^j & -2\beta^j \mu^j k v^j & -a^j \chi^j \mu^j & -2\beta^j \mu^j k v^j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{-\gamma^j z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\nu^j z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\gamma^j z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\nu^j z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^j \\ S^j \\ p^j \\ S^j \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.9)$$

dengan $y = \pm \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}}$ dan $v = \pm \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2}}$ untuk mengestimasi matriks D^j pada setiap lapisan, maka syarat dibawah ini harus diterapkan Persamaan (2.10)

$$f^j(z^j) = f^{j+1}(z^{j+1}) \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.10)$$

Karena hasil observasi dari matriks A^j berisi konstanta yang dapat mempengaruhi sifat lapisan, maka matriks dapat bernilai ekstrim, sehingga menyebabkan kesalahan dalam perhitungan. Untuk mengatasi tersebut, maka persamaan (2.9) dapat dirubah menjadi seperti Persamaan (2.11)

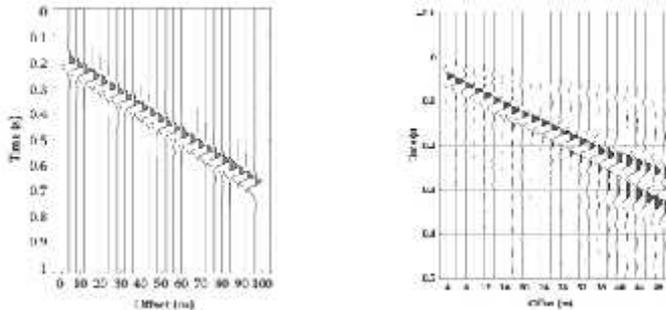
$$\begin{bmatrix} k & v^j & k & v^j \\ y^j & k & -y^j & -k \\ -2\mu^j k y^j & -\chi^j \mu^j & 2\mu^j k y^j & \chi^j \mu^j \\ -\chi^j \mu^j & -2\mu^j k v^j & -\chi^j \mu^j & -2\mu^j k v^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-y^j(\alpha - \alpha^{j-1})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-v^j(\alpha - \alpha^{j-1})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-y^j(\alpha - \alpha^{j-1})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-v^j(\alpha - \alpha^{j-1})} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{u^j}{\omega} e^{-y^j \alpha^{j-1}} & p^j \\ \frac{p^j}{\omega} e^{-y^j \alpha^{j-1}} & S^j \\ \frac{u^j}{\omega} e^{-y^j \alpha^{j-1}} & p^j \\ \frac{p^j}{\omega} e^{-y^j \alpha^{j-1}} & S^j \end{bmatrix} = E^j \Lambda^j \begin{bmatrix} C_p^j \\ C_s^j \\ C_p^j \\ C_s^j \end{bmatrix} = E^j \Lambda^j C^j \quad j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.11)$$

2.2.3 Dispersi Gelombang Rayleigh

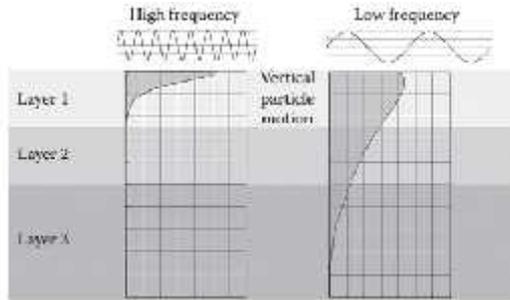
Pada media homogen-isotropik, gelombang Rayleigh tidak mengalami dispersi, yang berarti kecepatan rambatnya tidak merupakan fungsi frekuensi. Artinya cepat rambat gelombang Rayleigh konstan. Namun ketika pada medium heterogen vertikal, timbul fenomena dispersi, yang berarti kecepatan fase gelombang Rayleigh ini bergantung pada frekuensi. Gambar 2.4 bagian kiri memperlihatkan *trace* gelombang Rayleigh pada keadaan non-dispersif (homogen, isotropik), terlihat jika responnya tidak mengalami perubahan baik terhadap kedalaman maupun terhadap frekuensi. Sedangkan Gambar 2.4 bagian kanan menunjukkan pada

keadaan terdispersi (heterogen, isotropik), terlihat jika responnya mengalami perubahan frekuensi dengan fungsi kedalaman.



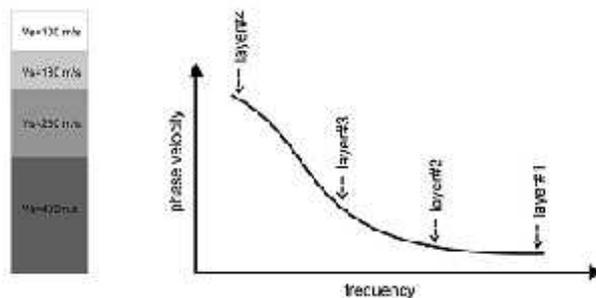
Gambar 2.4 Trace gelombang Rayleigh pada saat keadaan non-dispersif dan pada keadaan dispersif (Foti *et al.*, 2015)

Gambar 2.5 (sebelah kiri) menunjukkan perambatan gelombang Rayleigh secara vertikal dengan frekuensi yang tinggi. Pada kasus ini, pergerakan partikel yang terjadi hanya dipengaruhi oleh 1 *wavefront* saja yakni pada lapisan 1. Namun pada gambar sebelah kanan, yang merupakan gelombang Rayleigh yang berfrekuensi rendah dan dapat merambat hingga kedalaman lapisan ke-3. Kasus ini menunjukkan bahwa pergerakan partikel yang terjadi merupakan hasil dari interaksi ketiga lapisan. Berbeda dengan kasus frekuensi tinggi yang hanya merupakan interaksi dari satu lapisan saja, pada frekuensi rendah kecepatan Rayleigh merupakan kombinasi dari 3 lapisan tersebut. Dari sinilah terjadinya karakteristik khusus gelombang Rayleigh yaitu dispersi gelombang (Foti *et al.*, 2015).



Gambar 2.5 Geometri dispersi Gelombang Rayleigh (Foti *et al.*, 2015)

Dari sifat dispersi gelombang Rayleigh ini, dapat diidentifikasi struktur ke-heterogenitasan lapisan. Dispersi ini dapat disajikan dengan membuat kurva antara kecepatan fase dan frekuensi. Pada Gambar 2.6 telah ditunjukkan contoh permodelan kurva dispersi pada sebuah medium heterogen, isotropik. Medium yang digunakan mengandung lapisan yang memiliki densitas yang bertambah seiring bertambahnya kedalaman. Pembacaan kurva dispersi dimulai dari ujung kurva sebelah kanan.



Gambar 2.6 Contoh kurva dispersi Gelombang Rayleigh dengan normal dispersi (Dal Moro *et al.*, 2014)

Perhitungan kecepatan fase yang digunakan untuk membuat suatu kurva dispersi dapat dilakukan dengan berbagai cara. Pada penelitian ini digunakan *Fast Generalized R/T (Reflection and Transmission) coefficient* (FGRT) yang digagas oleh Sungkono dan Santosa (2011). Metode ini merupakan pengembangan dari metode *Generalized R/T* dan merupakan pengembangan dari persamaan kontinuitas (Pei, 2007). Persamaan tersebut dapat dituliskan seperti Persamaan (2.12)

$$\begin{bmatrix} \Lambda_d^j(z^j) \\ R_d^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1^j & E_1^j \\ E_2^j & E_2^j \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_1^{j+1} & E_1^{j+1} \\ E_2^{j+1} & E_2^{j+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{T}_d^j \\ \Lambda_u^{j+1}(z^j) R_u^j \check{T}_d^j \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

R dan T pada persamaan di atas adalah koefisien Refleksi dan Transmisi. Untuk mencari nilai kecepatan fase Rayleigh, maka persamaan di atas harus diterapkan pada keadaan permukaan bebas ($z=0$), sehingga akan menjadi Persamaan (2.13)

$$S^1(0) = (E_2^1 + E_2^1 \Lambda_u^1(0) \check{R}_d^1) C_d^1 \quad (2.13)$$

Persamaan (2.13) ini memiliki solusi non trivial untuk beberapa kecepatan yang tertulis pada Persamaan (2.14)

$$\det(E_2^1 + E_2^1 \Lambda_u^1(0) \check{R}_d^1) = 0 \quad (2.13)$$

Atau

$$S(f, V_R, V_p, V_s, \rho, H) = 0 \quad (2.14)$$

Dengan f adalah frekuensi, V_R adalah kecepatan fase gelombang Rayleigh, V_p adalah kecepatan gelombang primer, V_s adalah kecepatan gelombang geser, ρ adalah densitas dan H adalah tebal lapisan. Setelah Persamaan (2.14) dicari nilai akarnya menggunakan metode *bisection*, maka kecepatan fase gelombang Rayleigh akan diperoleh (Sungkono dan Santosa, 2011).

2.3 Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

Saat ini banyak sekali metode-metode geofisika yang dikembangkan untuk berbagai macam kepentingan investigasi

lapisan atau struktur tanah. Salah satunya adalah untuk investigasi dekat permukaan. Investigasi dekat permukaan mengalami perkembangan yang sangat pesat karena banyak sekali dibutuhkan untuk kepentingan geoteknik.

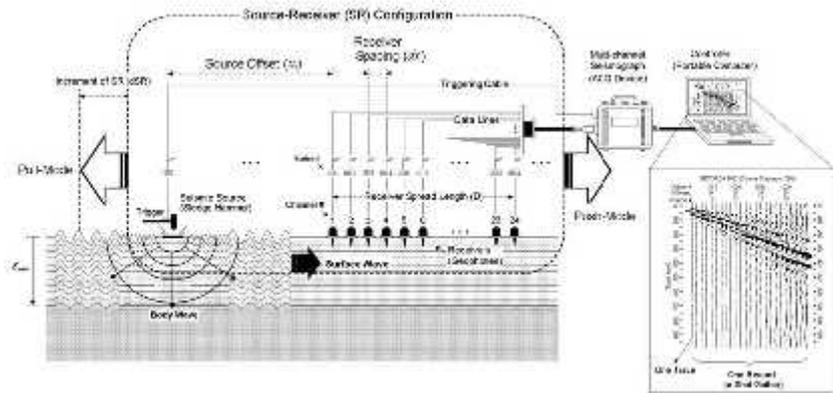
Pada awalnya, digunakan metode seismik konvensional untuk investigasi dekat permukaan. Namun dirasa kurang efektif, karena metode seismik konvensional ini memiliki frekuensi yang cukup tinggi (sekitar 50 Hz) sehingga penjalaran *wavelet* nya tidak bisa mencapai kedalaman yang diinginkan, selain itu pada seismik konvensional juga terdapat banyak sekali sinyal yang tidak dibutuhkan dalam investigasi dekat permukaan (gelombang refraksi dan refleksi). Sehingga dalam pengolahan datanya dibutuhkan waktu yang cukup lama (Park *et al.*, 2007).

Pada awal tahun 1980, dikembangkan sebuah metode baru untuk kepentingan investigasi dekat permukaan yaitu SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). Metode ini menggunakan sepasang *geophone* dalam analisisnya untuk mendapatkan informasi kecepatan gelombang geser (Park *et al.*, 1999). Namun metode ini juga tidak dapat memodelkan kecepatan gelombang geser dengan baik karena memiliki beberapa kelemahan yaitu (Foti *et al.*, 2015): (1) lamanya proses pengambilan data; (2) data yang didapatkan dari metode SASW memiliki sinyal noise yang lumayan tinggi dan susah dalam memisah noise tersebut dari datanya; (3) tidak mampu memisahkan mode dasar dan mode yang lebih tinggi, sehingga memiliki kemungkinan kesalahan identifikasi modanya.

Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) adalah metode dekat permukaan yang cukup terkenal dan berkembang akhir-akhir ini. Metode ini sangat digemari karena bisa memberikan informasi kecepatan gelombang geser (V_s) guna investigasi struktur dekat permukaan secara efektif, murah, efisien dan mudah dalam pengolahannya. MASW memberikan informasi tentang kecepatan gelombang geser (V_s) 1D. Biasanya untuk pengambilan data digunakan frekuensi sumber 3-30 Hz dan menggunakan *multichannel* perekam (*geophone*) yang disusun

memanjang. Perekam yang digunakan bisa sejumlah 12 atau 24 dengan jarak antar perekam sama. (Park *et al.*, 2007).

Menurut Park *et al.*, 2007 MASW dapat dilakukan dengan prosedur pada Gambar 2.7. Menurut beliau, MASW dilaksanakan dalam 3 tahap yaitu (1) akuisisi; (2) ekstraksi kurva dispersi; (3) inversi kurva dispersi. Metode ini menghasilkan profil kecepatan gelombang geser 1D.



Gambar 2.7 Tahapan dalam metode MASW untuk mendapatkan kurva dispersi (www.masw.com)

2.4 Pemodelan Geofisika

Tujuan utama dari kegiatan eksplorasi geofisika adalah untuk membuat model bawah permukaan bumi dengan menggunakan data lapangan yang diukur pada permukaan bumi. Dari model bawah permukaan yang diperoleh, menggambarkan sifat fisis dari batuan yang diteliti. Sehingga pada akhirnya kita dapat mengkarakterisasi kondisi geologi bawah permukaan. Model yang kita dapat adalah representasi dari keadaan geologi bawah permukaan yang memiliki besaran fisis dan geometri tertentu (Grandis, 2009).

Pemodelan yang ada dalam geofisika dibagi menjadi dua, yaitu pemodelan ke depan atau *forward modelling* dan pemodelan inversi atau *inverse modelling*. Keduanya memiliki peran dan fungsi masing-masing. Pemodelan ke depan adalah tahapan dimana menghitung “data” yang akan teramati jika nilai parameter fisis kita ketahui. Sedangkan pemodelan inversi adalah kebalikan dari pemodelan ke depan dimana kita harus mencari parameter fisis bumi berdasarkan “data” yang kita peroleh dari akuisisi. Pemodelan inversi biasa juga disebut sebagai tahapan *data fitting* karena dalam prosesnya kita mencari nilai parameter yang terbaik dan cocok dengan data pengamatan (data observasi).

2.4.1 Inversi RR-PSO

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah salah satu metode optimum global yang meniru perilaku sekawanan burung yang sedang mencari makan. Selain dari faktor tiap individu, pergerakan burung ini akan dipengaruhi juga oleh aspek sosial. Jadi tiap burung (selanjutnya disebut partikel) akan bergerak mencari mangsanya berdasarkan kecerdasannya dan pengaruh dari perilaku kelompoknya. Sehingga apabila ada salah satu burung yang menemukan mangsa, maka satu kawanan tersebut akan segera mengikuti jalan dan posisi burung tersebut. (Santosa, 2011)

Metode *global optimization* mampu menyelesaikan permasalahan inversi sebagai fungsi optimasi. Keunggulan lain dari metode global adalah metode ini tidak membutuhkan tebakan awal untuk bisa menyelesaikan permasalahan inversi. Berbeda dengan metode lokal yang stabilitas proses inversinya tergantung dari tebakan awal yang kita berikan. Jadi ketika tebakan awal bagus dan mendekati nilai yang sebenarnya, maka proses inversi akan berjalan dengan baik. Namun apabila tebakan awal yang diberikan tidak sesuai, maka proses inversinya tidak stabil.

Karena keunggulannya ini, PSO sangat berkembang pesat, pada tahun 2008 Fernandez- Martinez et al. menyempurnakan ide tentang memodelkan algoritma PSO dengan memakai skema dari

getaran teredam dari sebuah pegas dan berhasil menurunkan persamaan yang bersifat stokastik seperti pada Persamaan (2.15)

$$\begin{aligned} X''(\mathbf{t}) + (1 - \omega)X'(\mathbf{t}) + \phi(\mathbf{t}) &= \phi_1 g(\mathbf{t}) + \phi_2 l(\mathbf{t}), \mathbf{t} \in \mathbb{R} \\ X(0) &= X_0 \\ X'(0) &= V_0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

Solusi ini didekati dengan menggunakan *finite difference*. Dengan menggunakan *backward difference* untuk solusi kecepatan dan *center difference* untuk solusi akselerasi, maka didapatkan algoritma *Generalized Particle Swarm Optimization* (GPSO) pada Persamaan (2.16)

$$\begin{aligned} v(\mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}) &= (1 - (1 - \omega)\Delta\mathbf{t})v(\mathbf{t}) + \phi_1 \Delta\mathbf{t}[g(\mathbf{t}) - x(\mathbf{t})] + \phi_2 \Delta\mathbf{t}(l(\mathbf{t}) - x(\mathbf{t})) \\ x(\mathbf{t} + \Delta\mathbf{t}) &= x(\mathbf{t}) + v(\mathbf{t} + \Delta\mathbf{t})\Delta\mathbf{t} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.15) merupakan fungsi *Generalized Particle Swarm Optimization* (GPSO) yang menggantikan fungsi dari PSO yang konvensional.

Fernandez-Martinez (2012) mengembangkan berbagai macam metode PSO berbasis Persamaan (2.15). Yang terbaru adalah *Regressive-Regressive Particle Swarm Optimization* (RR-PSO). Algoritma ini memiliki tingkat konvergensi dan stabilitas yang terbaik jika dibandingkan dengan varian PSO yang lainnya. RR-PSO menggunakan skema *backward difference* pada fungsi kecepatan dan akselerasinya sehingga didapatkan Persamaan (2.17)

$$\begin{aligned} x'(\mathbf{t}) &\simeq \frac{x(\mathbf{t}) - x(\mathbf{t} - \Delta\mathbf{t})}{\Delta\mathbf{t}}, \\ x''(\mathbf{t}) &\simeq \frac{x(\mathbf{t}) - 2x(\mathbf{t} - \Delta\mathbf{t}) + x(\mathbf{t} - 2\Delta\mathbf{t})}{\Delta\mathbf{t}^2} = \frac{x'(\mathbf{t}) - x'(\mathbf{t} - \Delta\mathbf{t})}{\Delta\mathbf{t}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Persamaan (2.17) disubstitusikan ke Persamaan (2.15) menjadi

$$X(\mathbf{t}) = X(\mathbf{t} - \Delta\mathbf{t}) + V(\mathbf{t})\Delta\mathbf{t},$$

$$\frac{V(t)-V(t-\Delta t)}{\Delta t} + (1-\omega)V(t) + \phi(X(t-\Delta t)) + V(t)\Delta t = \phi_1 g(t-l_0) + \phi_2 l(t-l_0)$$

$$V(t) = \frac{V(t-\Delta t) + \phi_1 \Delta t (g(t-l_0) - X(t-\Delta t))}{1 + (1-\omega)\Delta t + \phi \Delta t^2} + \frac{\phi_2 \Delta t (l(t-l_0) - X(t-\Delta t))}{1 + (1-\omega)\Delta t + \phi \Delta t^2} \quad (2.18)$$

Maka secara umum algoritma RR-PSO dapat dituliskan seperti pada Persamaan (2.19)

$$v(t + \Delta t) = \frac{V(t) + \phi_1 \Delta t (g(t) - X(t)) + \phi_2 \Delta t (l(t) - X(t))}{1 + (1-\omega)\Delta t + \phi \Delta t^2},$$

$$X(t + \Delta t) = X(t) + V(t + \Delta t)\Delta t \quad (2.19)$$

Dengan $\phi = \phi_1 + \phi_2$ dan $\Delta t = 1$.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Secara garis besar penelitian ini dilakukan berdasarkan diagram alir pada Gambar 3.1. Pengambilan data dilakukan pada tanggul P76-P77, P78-P79, P79-P82 dan P83-P84.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

1.) Studi Literatur

Tahapan ini dilakukan untuk memperkuat dan mempelajari teori-teori yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini. Studi literatur dilaksanakan dengan cara mempelajari dan mengkaji buku-buku dan penelitian atau paper yang sudah dilakukan sebelumnya mengenai penelitian ini. Teori-teori yang dipelajari antara lain gelombang permukaan, gelombang Rayleigh, dispersi Rayleigh dan inversi RR-PSO.

2.) Ekstraksi Kurva Dispersi

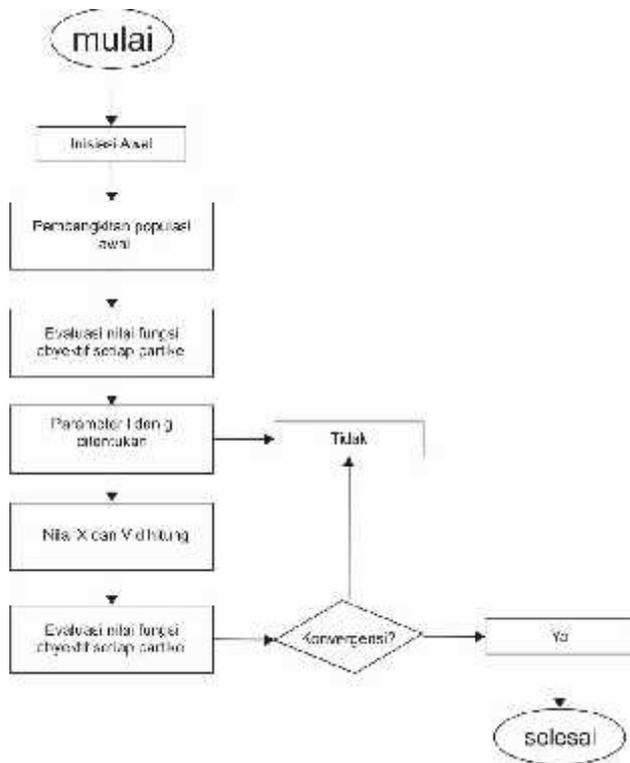
Tahapan ini dilakukan menggunakan *software* Matlab yang memiliki tujuan untuk mengekstrak kurva dispersi dari data lapangan. Kurva dispersi adalah kurva antara kecepatan fase terhadap frekuensi. Dari pembentukan kurva ini dapat dilihat secara kualitatif banyaknya lapisan yang ada pada data lapangan.

3.) Inversi Data Lapangan

Tahapan ini menggunakan metode RR-PSO yang dibagi menjadi beberapa tahap. Yang pertama adalah penentuan *search space* guna proses inversi. Penentuan nilai ini didasarkan dari nilai referensi SPT dan bor pada penelitian sebelumnya. Lalu yang kedua adalah proses pengolahan data, algoritma yang dipakai menggunakan 200 partikel dan 100 generasi. Algoritma PSO dapat disimpulkan sebagai berikut,

1. Menentukan jumlah partikel sebanyak N
2. Membangkitkan nilai posisi awal X dan kecepatan V
3. Evaluasi nilai awal dengan fungsi
4. Menghitung nilai kecepatan dari semua partikel

5. Mencari Pbest (posisi terbaik masing-masing partikel pada setiap iterasi) dan Gbest (posisi terbaik yang dimiliki partikel)



Gambar 3.2 Diagram alir algoritma RR-PSO

4.) Analisis

Hasil inversi yang didapatkan berupa profil kecepatan gelombang geser 1D. Untuk melihat kondisi tanggul secara penuh sulit jika hanya menggunakan profil 1D saja. Oleh karena itu pada

penelitian ini dilakukan pembuatan penampang *quasi* 2D kecepatan gelombang geser. Lalu setelah didapatkan penampang *quasi* 2D, dilakukan interpretasi yang didasarkan dari penelitian-penelitian sebelumnya pada daerah yang sama.

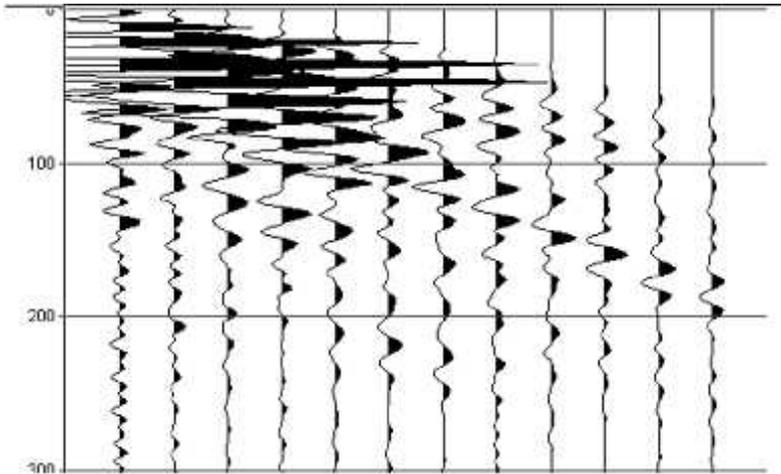
5.) Kesimpulan

Tahapan terakhir adalah kesimpulan hasil penelitian. Kesimpulan ini menyimpulkan hasil analisa data dan interpretasi hasil analisa data.

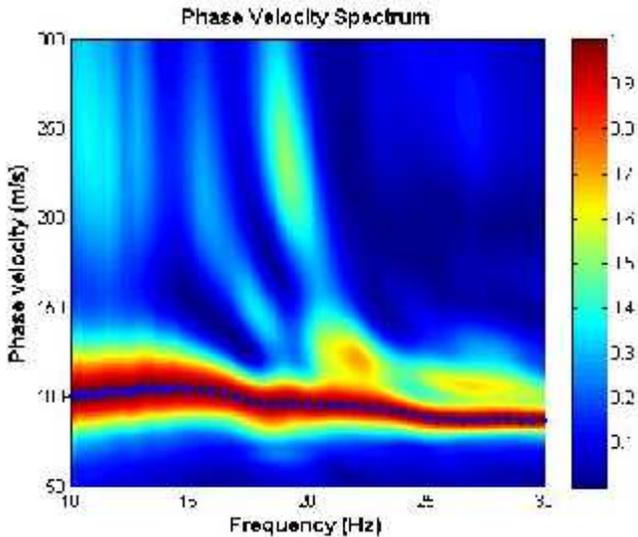
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data Kurva Dispersi

Setelah didapatkan data hasil pengukuran di lapangan (seperti pada Gambar 4.1) data yang didapatkan adalah waktu tiba gelombang terhadap jarak atau *offset*, terlebih dahulu data yang memiliki format SEG-Y ini diolah dengan menggunakan Matlab untuk mendapatkan kurva dispersi gelombang Rayleigh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Kurva dispersi ini adalah kurva nilai kecepatan fase terhadap frekuensi. Kurva ini menggambarkan sifat dispersi pada Gelombang Rayleigh. Jadi sebenarnya setelah mendapatkan kurva dispersi ini kita bisa melakukan analisa kualitatif untuk memperkirakan jumlah lapisan yang ada.



Gambar 4.1 Contoh data lapangan pada tanggul P76 – P77



Gambar 4.2 Contoh kurva dispersi pada tanggul P76-P77

4.2 Analisa Hasil Inversi

Pada proses inversi ini, dihasilkan parameter model bawah permukaan berupa kecepatan gelombang geser (V_s) dan ketebalan (H). Sebelum melakukan pengolahan pada data yang sudah didapatkan dari hasil akuisisi, terlebih dahulu ditentukan ruang model (*search space*). Guna ruang model ini adalah sebagai tebakan awal pada proses inversi.

Untuk parameter ketebalan (H), digunakan hasil SPT dan bor (Sungkono et al., 2014). Ruang model yang digunakan ini adalah hasil dari penelitian pada tanggul LUSI. Sehingga diharapkan pada proses inversi akan banyak membantu. Rentang nilai yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1. Sedangkan untuk nilai kecepatan gelombang geser didasarkan pada nilai kecepatan gelombang geser pada kurva dispersi.

Tabel 4.1 *Search space* yang digunakan pada inversi

H (m)	Kecepatan Gelombang Geser (m/s)
0.5 – 12	60 - 400
1 – 15	100 – 400
1 – 20	100 – 400
<i>Half space</i>	200 - 900

Nilai kecepatan gelombang geser V_s yang dihasilkan dari proses inversi dapat digunakan untuk menentukan kandungan dan jenis tanah pada tempat yang diteliti. Namun karena solusi dari proses inversi sendiri memiliki ketidakunikan, maka pada proses analisa nantinya hasil yang didapatkan akan dikorelasikan dengan kondisi geologi tanggul, maupun dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada tanggul tersebut.

Untuk penentuan kandungan dan jenis batuan, digunakan nilai-nilai model yang digunakan Dal Moro (2015). Nilai-nilai yang ada pada Tabel 4.1 ini adalah nilai kecepatan gelombang geser yang dimiliki material-material yang biasanya ada pada investigasi dekat permukaan.

Karena sedimentasi tanggul yang biasanya mengandung material-material di Tabel 4.2, maka nilai-nilai ini dijadikan sebagai dasar penentuan dan interpretasi hasil inversi.

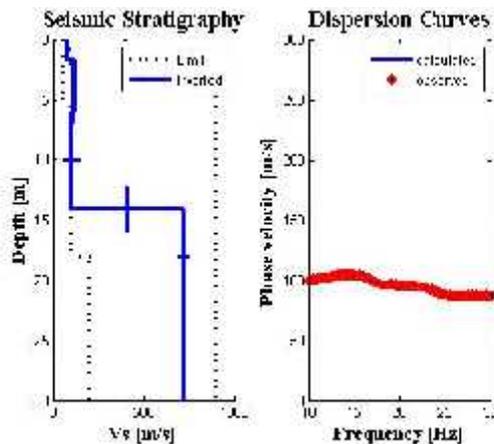
Tabel 4.2 Nilai kecepatan gelombang geser pada material (Dal Moro, 2015)

Material	Kecepatan Gelombang Geser (m/s)
Gambut dan tanah <i>incompetent</i>	50-150
Silt, Clay, Sand	150-350

Tanah dan gravel	350-600
Batuan Lapuk	600-800

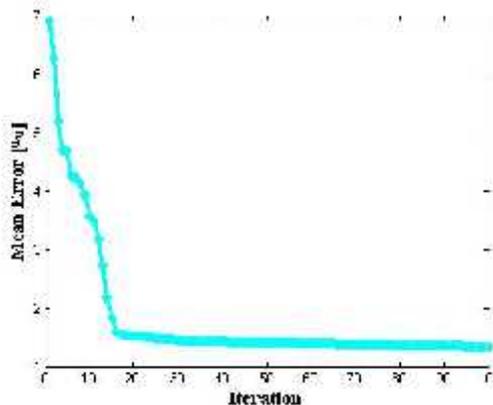
Setelah dilakukan proses inversi untuk data lapangan, maka didapatkan beberapa hasil atau *output*. Yang pertama adalah nilai posterior, nilai error dan profil kecepatan gelombang geser. Tanggul P76-P77, P78-P79, P79-P82 dan P83-P84 ini memiliki panjang sekitar 260m, 320m, 240m dan 320m dengan spasi antar titik berjarak 20m. Gambar 4.3 (sebelah kanan) menunjukkan perbandingan kurva dispersi perhitungan dan pengamatan. Dapat dilihat bahwa hasil *fitting* kurva dispersi relatif baik. Memang pada beberapa titik menunjukkan adanya beberapa *outlier* namun secara umum *fitting* yang dihasilkan baik. Sedangkan Gambar 4.3 (sebelah kiri) menunjukkan model kecepatan gelombang geser 1D yang didasarkan dari kurva dispersi perhitungan. Dari profil tersebut bisa diketahui nilai kecepatan gelombang geser dan ketebalan serta kedalaman lapisan yang terdeteksi.

Dari profil kecepatan gelombang geser 1D (Gambar 4.3) bisa diperkirakan bahwa ada 2 lapisan yang terdeteksi. Yaitu pada kedalaman 0 – 12 meter dan pada 12 – 30 meter. Kemungkinan lapisan pertama yang ditunjukkan Gambar 4.3 ini adalah milik tanggul. Karena tinggi tanggul sendiri berkisar 15 meter. Jika didasarkan pada Tabel 4.2, lapisan pertama ini kemungkinan adalah materi *silt*, *clay* dan *sand* sedang lapisan kedua adalah materi tanah yang bercampur dengan gravel.



Gambar 4.3 Model Kecepatan Gelombang Geser Vs satu dimensi

Error yang dihasilkan proses inversi pada penelitian ini relatif kecil dengan kisaran 0.5% sampai 10%. Nilai error ini bisa dikategorikan bagus karena masih memiliki nilai di bawah 10%. Seperti yang bisa dilihat pada Gambar 4.4 bahwa grafik nilai error berdasarkan iterasi menunjukkan bahwa algoritma yang digunakan mampu menghasilkan nilai konvergensi pada waktu yang relatif cepat.

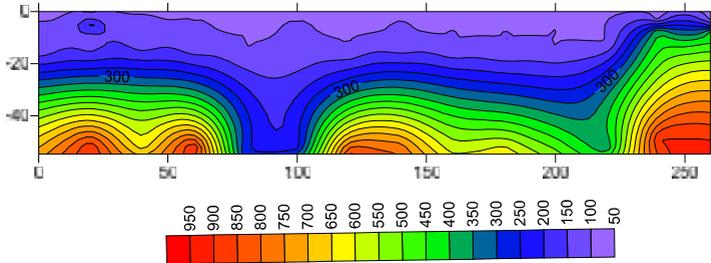


Gambar 4.4 Nilai error hasil dari proses inversi

4.3 Interpretasi Hasil Inversi

4.3.1 Tanggul P76 – P77

Setelah dilakukan proses inversi pada setiap titik dan menghasilkan profil kecepatan gelombang geser satu dimensi, maka profil tersebut digunakan sebagai *inputan* untuk membuat penampang *quasi* 2D dengan menggunakan *software* Surfer 11. Langkah ini bertujuan untuk memudahkan pada interpretasi hasil. Karena apabila hanya melihat 1 dimensi saja, maka anomali tidak bisa terlihat.



Gambar 4.5 Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P76-P77

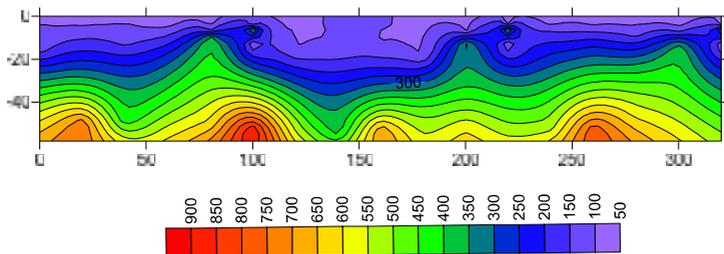
Penampang pada Gambar 4.5 menggambarkan profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman sepanjang tanggul 76-77. Jika dilihat sekilas saja, dari Gambar 4.5 ini langsung memberikan sesuatu yang menarik pada jarak 75-100m dan pada kedalaman sekitar lebih dari 40m. Penampang yang ada pada area tersebut sangat berbeda dari sekitarnya.

Karena jika dilihat pada penampang tersebut, pada kedalaman mulai 30m bisa diasumsikan sebagai lapisan bedrock. Sedangkan untuk tanggul sendiri memiliki kedalaman hingga sekitar 15m di bawah permukaan. Namun pada anomali yang berada pada jarak 75m tersebut menunjukkan nilai kecepatan gelombang geser yang rendah jika dibandingkan dengan nilai disekitarnya.

Menurut Sukardi (1992) patahan Watukosek membentang dari arah NE-SW (seperti Gambar 4.6) yaitu dari singkapan

4.3.2 Tanggul P78 – P79

Penampang yang dihasilkan (Gambar 4.7) memberikan gambaran bahwa pada tanggul ini tidak ditemukan struktur atau bentukan yang aneh. Juga tidak ditemukan adanya anomali pada penampang yang dapat mengakibatkan longsor atau amblesan. Nilai kecepatan gelombang geser yang didapatkan menunjukkan bahwa tanggul ini tersusun atas material pasir, lempung dan lanau. Untuk kedalaman yang lebih dari kurang lebih 30m diasumsikan merupakan lapisan *bedrock* yang tersusun atas batuan solid dan gravel yang memiliki nilai kecepatan gelombang geser antara 550 m/s hingga 800 m/s (Dal Moro, 2015).



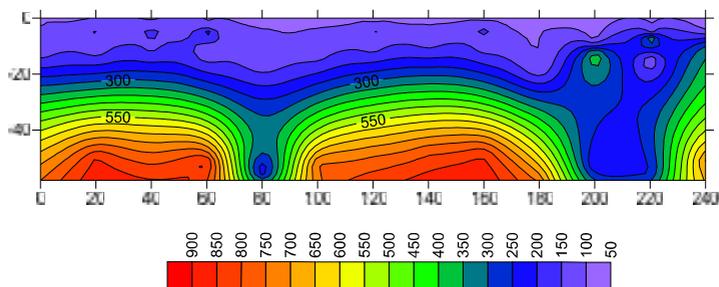
Gambar 4.7 Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P78-P79

Bisa dibilang tanggul ini relatif aman dari potensi penurunan tanah maupun amblesan tanggul. Hal ini bisa dimungkinkan karena posisi tanggul sendiri. Posisi tanggul P78-P79 ini tidak langsung berhadapan dengan pusat semburan, dan juga tidak tegak lurus terhadap semburan maka tidak menerima langsung gaya tekan yang keluar dari pusat semburan.

4.3.3 Tanggul P79 – P82

Menurut Husein (2015), tanggul P79-P82 jika dibandingkan dengan tanggul yang lain memiliki elevasi yang paling rendah. Sehingga dimungkinkan fluida yang menyembur dari pusat semburan memiliki kemungkinan yang tinggi mengalir ke bagian

tanggul ini. Banyak penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai tanggul LUSI, khususnya pada tanggul ini. Karena rendahnya elevasi yang dimiliki tanggul sendiri, sehingga dibutuhkan monitoring yang berkala di bagian ini.



Gambar 4.8 Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P79-P82

Lintasan ini sendiri memiliki panjang sekitar 240m yang terletak pada tanggul P79-P82. Penampang dua dimensi (Gambar 4.8) yang dihasilkan menunjukkan setidaknya ada 2 anomali yang perlu diperhatikan. Yaitu pada jarak sekitar 80m dan pada jarak sekitar 200m hingga 220m. Kedua anomali ini perlu diperhatikan dan dianalisa karena letaknya yang pada kedalaman sekitar 40m (kemungkinan sudah merupakan lapisan *bedrock*) namun memiliki nilai kecepatan gelombang geser yang relatif rendah jika dibandingkan dengan sekitarnya yang bernilai relatif tinggi.

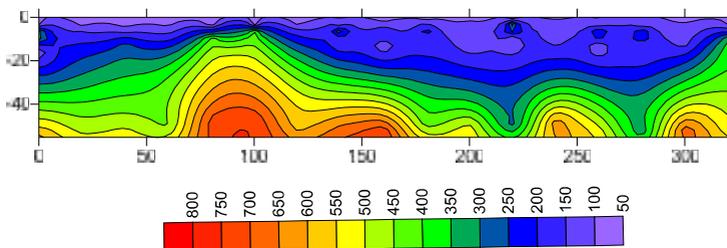
Menurut Hidayatullah (2016) tanggul P79-P82 ini tersusun atas *clay* atau lumpur. Namun menurut Husein (2015) tanggul ini tersusun atas batu, gravel dan batu pasir. Kedua hasil penelitian ini mendukung penampang yang dihasilkan pada penelitian ini. Tanggul sendiri yang memiliki kedalaman hingga sekitar 15m, pada penampang Gambar 4.8 memiliki warna biru dan sedikit ungu. Warna ini mewakili nilai kecepatan gelombang geser kisaran 50 m/s hingga 250 m/s. Dan jika dihubungkan lagi dengan hasil penelitian dari Dal Moro (2015) yang mengatakan bahwa

kisaran nilai tersebut adalah materi lanau, *clay*, *silt* dan batuan pasir. Maka asumsi yang digunakan bisa dibilang cukup akurat.

Lalu untuk anomali yang terjadi pada titik 80m dan 200m memiliki nilai kecepatan gelombang geser yang rendah (menurut Dal Moro, 2015 adalah material lempung, pasir dan silt) jika dibandingkan dengan sekitarnya. Maka bisa jadi anomali ini adalah patahan ataupun memang struktur cekungan. Karena pada penelitian sebelumnya, yaitu pada penelitian Husein (2014) memiliki kesimpulan dan hasil bahwa pada tanggul ini memiliki struktur bawah permukaan yang memiliki potensi penurunan tanah (*subsidence*) yang tinggi. Dan asumsi ini juga diperkuat dengan tingkat penurunan tanah yang tinggi pada tanggul ini (Husein, 2015) jika dibandingkan dengan bagian tanggul yang lainnya.

4.3.4 Tanggul P83 – P84

Lintasan pengukuran yang telah dilakukan pada tanggul ini memiliki panjang sekitar 320m. Lintasan ini merupakan lintasan yang terpanjang jika dibandingkan dengan lintasan lainnya yang telah diukur. Tanggul P83-P84 sendiri bisa dibilang merupakan tanggul yang jarang mengalami gangguan baik itu penurunan tanah, longsor maupun amblas.



Gambar 4.9 Penampang kecepatan gelombang geser tanggul P83-P84

Menurut Hidayatullah (2016) tanggul ini didominasi oleh batuan pasir dan batu kerikil. Sedangkan menurut Dal Moro (2015) dan berdasarkan nilai kecepatan gelombang geser yang

ada pada penampang 2 dimensi, tanggul ini tersusun atas lanauan, batu pasir, kerikil, lempung dan *silt*. Gambar 4.9 menunjukkan adanya anomali yaitu pada jarak sekitar 225m dan 280m dengan kedalaman sekitar 50m dibawah permukaan tanah. Kemungkinan anomali ini adalah retakan kecil yang bisa saja disebabkan oleh getaran yang ditimbulkan oleh aktifitas mesin penyedot lumpur yang setiap hari bekerja. Sebenarnya pada tanggul ini ada 3 titik yang dipotong oleh pipa lumpur. Namun kenyataannya pada penampang yang didapatkan, anomali pipa tersebut tidak terlihat dengan jelas. Hal ini bisa terjadi karena pipa tersebut juga mengalirkan material yang hampir sama dengan material penyusun tanggul, jadi kemungkinan metode ini tidak dapat membedakan secara jelas.

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

LAMPIRAN A
Hasil Inversi tiap Tanggul

A. P76 – P77

x	y	Vs
0	0	85.43299
0	-1.7537	85.43299
0	-1.7537	117.5587
0	-6.0405	117.5587
0	-6.0405	100
0	-14.0405	100
0	-14.0405	718.7312
0	-54.0405	718.7312
20	0	95.19481
20	-2.3542	95.19481
20	-2.3542	248.1226
20	-3.60683	248.1226
20	-3.60683	100
20	-11.3532	100
20	-11.3532	883.812
20	-51.3532	883.812
40	0	74.97799
40	-1.77774	74.97799
40	-1.77774	171.6506
40	-2.93981	171.6506
40	-2.93981	100
40	-10.935	100
40	-10.935	610.5397

40	-50.935	610.5397
60	0	82.32871
60	-2.76937	82.32871
60	-2.76937	141.6844
60	-4.06515	141.6844
60	-4.06515	100
60	-12.0537	100
60	-12.0537	899.6829
60	-52.0537	899.6829
80	0	71.61386
80	-1.78818	71.61386
80	-1.78818	100.1615
80	-6.78346	100.1615
80	-6.78346	100
80	-14.7793	100
80	-14.7793	260.5279
80	-54.7793	260.5279
100	0	60
100	-2.40774	60
100	-2.40774	143.1504
100	-3.64138	143.1504
100	-3.64138	100
100	-11.6324	100
100	-11.6324	226.9627
100	-51.6324	226.9627
120	0	62.5834
120	-1.65023	62.5834
120	-1.65023	100
120	-6.60196	100

120	-6.60196	100
120	-14.3622	100
120	-14.3622	855.4466
120	-54.3622	855.4466
140	0	60
140	-1.74612	60
140	-1.74612	124.9247
140	-3.67098	124.9247
140	-3.67098	100
140	-11.6709	100
140	-11.6709	770.3782
140	-51.6709	770.3782
160	0	60
160	-1.60012	60
160	-1.60012	103.7361
160	-6.55574	103.7361
160	-6.55574	100
160	-13.4592	100
160	-13.4592	585.6345
160	-53.4592	585.6345
180	0	90.71603
180	-3.60392	90.71603
180	-3.60392	102.0461
180	-7.30895	102.0461
180	-7.30895	100.0001
180	-13.8928	100.0001
180	-13.8928	632.5263
180	-53.8928	632.5263
200	0	70.28007

200	-1.41851	70.28007
200	-1.41851	102.7482
200	-5.67959	102.7482
200	-5.67959	100
200	-13.6793	100
200	-13.6793	509.4846
200	-53.6793	509.4846
220	0	91.75917
220	-1.24894	91.75917
220	-1.24894	104.0289
220	-4.3201	104.0289
220	-4.3201	100.0011
220	-12.3195	100.0011
220	-12.3195	367.0579
220	-52.3195	367.0579
240	0	87.51505
240	-4.1175	87.51505
240	-4.1175	399.9986
240	-6.58501	399.9986
240	-6.58501	400
240	-8.58501	400
240	-8.58501	900
240	-48.585	900
260	0	91.26686
260	-4.42988	91.26686
260	-4.42988	400
260	-7.03848	400
260	-7.03848	400
260	-9.03848	400

260	-9.03848	900
260	-49.0385	900

B. P78 – P79

x	y	Vs
0	0	80.3782
0	-2.5912077	80.3782
0	-2.5912077	142.1916
0	-6.676839	142.1916
0	-6.676839	100
0	-13.345102	100
0	-13.345102	645.8599
0	-53.345102	645.8599
20	0	72.3957
20	-2.2967429	72.3957
20	-2.2967429	129.125
20	-6.1604821	129.125
20	-6.1604821	142.2384
20	-9.6476585	142.2384
20	-9.6476585	734.65
20	-49.647658	734.65
40	0	74.88719
40	-2.7123714	74.88719
40	-2.7123714	161.5323
40	-5.5591165	161.5323
40	-5.5591165	100.024
40	-8.4344572	100.024
40	-8.4344572	419.9431

40	-48.434457	419.9431
60	0	60.00004
60	-2.109344	60.00004
60	-2.109344	130.9391
60	-7.1087559	130.9391
60	-7.1087559	168.0749
60	-10.622575	168.0749
60	-10.622575	548.8926
60	-50.622575	548.8926
80	0	78.6378
80	-2.4327013	78.6378
80	-2.4327013	160.9568
80	-7.4325386	160.9568
80	-7.4325386	400
80	-9.9151541	400
80	-9.9151541	615.7459
80	-49.915154	615.7459
100	0	107.6605
100	-4.2410468	107.6605
100	-4.2410468	396.2806
100	-5.3473737	396.2806
100	-5.3473737	100
100	-12.958081	100
100	-12.958081	899.1731
100	-52.958081	899.1731
120	0	75.92291
120	-2.0435955	75.92291
120	-2.0435955	100
120	-7.043593	100

120	-7.043593	100
120	-15.043593	100
120	-15.043593	563.9866
120	-55.043593	563.9866
140	0	132.1508
140	-1.3885106	132.1508
140	-1.3885106	100
140	-6.3865855	100
140	-6.3865855	105.7305
140	-13.827032	105.7305
140	-13.827032	381.4058
140	-53.827032	381.4058
160	0	121.8323
160	-1.3177451	121.8323
160	-1.3177451	100
160	-5.200533	100
160	-5.200533	101.8407
160	-13.200533	101.8407
160	-13.200533	693.9761
160	-53.200533	693.9761
180	0	91.9452
180	-5	91.9452
180	-5	100
180	-10	100
180	-10	100
180	-18	100
180	-18	561.9393
180	-58	561.9393
200	0	87.714

200	-5	87.714
200	-5	100
200	-7.3675977	100
200	-7.3675977	359.9176
200	-12.085033	359.9176
200	-12.085033	594.6708
200	-52.085033	594.6708
220	0	86.83749
220	-3.3702153	86.83749
220	-3.3702153	399.9994
220	-5.0316111	399.9994
220	-5.0316111	100.0047
220	-13.031553	100.0047
220	-13.031553	525.5273
220	-53.031553	525.5273
240	0	73.93509
240	-2.4707851	73.93509
240	-2.4707851	146.3439
240	-6.4038546	146.3439
240	-6.4038546	196.1422
240	-11.493823	196.1422
240	-11.493823	530.2547
240	-51.493823	530.2547
260	0	67.50092
260	-1.8684969	67.50092
260	-1.8684969	135.7014
260	-6.3880488	135.7014
260	-6.3880488	237.3134
260	-12.849301	237.3134

260	-12.849301	787.4445
260	-52.849301	787.4445
280	0	60.00271
280	-1.9108321	60.00271
280	-1.9108321	134.1913
280	-4.4191923	134.1913
280	-4.4191923	100.0082
280	-6.5104078	100.0082
280	-6.5104078	591.2366
280	-46.510408	591.2366
300	0	60.00002
300	-1.868811	60.00002
300	-1.868811	129.1327
300	-6.4581306	129.1327
300	-6.4581306	385.163
300	-14.218211	385.163
300	-14.218211	584.3225
300	-54.218211	584.3225
320	0	87.14655
320	-3.3938417	87.14655
320	-3.3938417	317.9979
320	-6.772043	317.9979
320	-6.772043	100
320	-13.493396	100
320	-13.493396	498.3142
320	-53.493396	498.3142

C. P79 – P82

x	y	Vs
0	0	96.21232
0	-3.04679	96.21232
0	-3.04679	165.4389
0	-5.42896	165.4389
0	-5.42896	107.5875
0	-11.2157	107.5875
0	-11.2157	688.0759
0	-51.2157	688.0759
20	0	103.5611
20	-3.00536	103.5611
20	-3.00536	167.5256
20	-4.98476	167.5256
20	-4.98476	105.0513
20	-10.2335	105.0513
20	-10.2335	853.1523
20	-50.2335	853.1523
40	0	97.92936
40	-2.75944	97.92936
40	-2.75944	181.4486
40	-3.898	181.4486
40	-3.898	126.7276
40	-10.0769	126.7276
40	-10.0769	772.6983
40	-50.0769	772.6983
60	0	99.84211
60	-3.27746	99.84211
60	-3.27746	240.1255

60	-4.656	240.1255
60	-4.656	100
60	-11.5509	100
60	-11.5509	858.3175
60	-51.5509	858.3175
80	0	86.45189
80	-2.28107	86.45189
80	-2.28107	131.0359
80	-7.28106	131.0359
80	-7.28106	101.8852
80	-14.6848	101.8852
80	-14.6848	200
80	-54.6848	200
100	0	82.32415
100	-1.90502	82.32415
100	-1.90502	135.2492
100	-6.90375	135.2492
100	-6.90375	116.4931
100	-12.21	116.4931
100	-12.21	755.0115
100	-52.21	755.0115
120	0	92.27706
120	-2.35337	92.27706
120	-2.35337	172.083
120	-4.13147	172.083
120	-4.13147	109.2985
120	-8.95035	109.2985
120	-8.95035	744.3429
120	-48.9504	744.3429

140	0	83.76296
140	-1.81308	83.76296
140	-1.81308	138.6651
140	-4.02416	138.6651
140	-4.02416	114.3731
140	-7.94593	114.3731
140	-7.94593	787.7469
140	-47.9459	787.7469
160	0	86.54205
160	-1.79653	86.54205
160	-1.79653	189.3235
160	-3.33639	189.3235
160	-3.33639	108.4494
160	-8.81961	108.4494
160	-8.81961	844.1419
160	-48.8196	844.1419
180	0	98.64093
180	-5	98.64093
180	-5	100
180	-10	100
180	-10	100
180	-18	100
180	-18	739.881
180	-58	739.881
200	0	77.18117
200	-3.63517	77.18117
200	-3.63517	100
200	-8.63517	100
200	-8.63517	399.9872

200	-12.6015	399.9872
200	-12.6015	200
200	-52.6015	200
220	0	100.0243
220	-4.59674	100.0243
220	-4.59674	371.8089
220	-7.19359	371.8089
220	-7.19359	100
220	-14.9219	100
220	-14.9219	247.2253
220	-54.9219	247.2253
240	0	65.46308
240	-2.43422	65.46308
240	-2.43422	139.8681
240	-5.49645	139.8681
240	-5.49645	335.9928
240	-10.9097	335.9928
240	-10.9097	706.8064
240	-50.9097	706.8064

D. P83 – P84

x	y	Vs
0	0	99.72371
0	-4.17702	99.72371
0	-4.17702	400
0	-7.48248	400
0	-7.48248	100

0	-15.3077	100
0	-15.3077	614.5694
0	-55.3077	614.5694
20	0	74.62701
20	-2.3771	74.62701
20	-2.3771	150.0093
20	-6.26657	150.0093
20	-6.26657	208.6358
20	-12.8345	208.6358
20	-12.8345	491.8774
20	-52.8345	491.8774
40	0	60
40	-1.71282	60
40	-1.71282	120.4971
40	-5.62834	120.4971
40	-5.62834	258.8618
40	-11.7244	258.8618
40	-11.7244	507.0709
40	-51.7244	507.0709
60	0	80.40677
60	-2.47223	80.40677
60	-2.47223	136.4434
60	-6.5368	136.4434
60	-6.5368	180.5668
60	-9.54521	180.5668
60	-9.54521	440.968
60	-49.5452	440.968
80	0	66.56973
80	-1.3826	66.56973

80	-1.3826	107.6205
80	-5.63064	107.6205
80	-5.63064	394.2654
80	-7.64387	394.2654
80	-7.64387	718.1844
80	-47.6439	718.1844
100	0	93.27811
100	-4.42036	93.27811
100	-4.42036	399.1924
100	-5.42042	399.1924
100	-5.42042	399.9673
100	-7.48819	399.9673
100	-7.48819	740.6932
100	-47.4882	740.6932
120	0	75.70679
120	-2.40089	75.70679
120	-2.40089	160.8761
120	-5.55943	160.8761
120	-5.55943	228.3912
120	-10.594	228.3912
120	-10.594	581.2442
120	-50.594	581.2442
140	0	99.38631
140	-3.14348	99.38631
140	-3.14348	323.809
140	-5.71565	323.809
140	-5.71565	135.6307
140	-10.4625	135.6307
140	-10.4625	659.416

140	-50.4625	659.416
160	0	80.27607
160	-2.46055	80.27607
160	-2.46055	243.2204
160	-6.88336	243.2204
160	-6.88336	100.001
160	-12.3299	100.001
160	-12.3299	738.8142
160	-52.3299	738.8142
180	0	78.14478
180	-2.58491	78.14478
180	-2.58491	275.3961
180	-4.47314	275.3961
180	-4.47314	154.6103
180	-9.00385	154.6103
180	-9.00385	425.1912
180	-49.0039	425.1912
200	0	62.6351
200	-1.72048	62.6351
200	-1.72048	173.6183
200	-3.75951	173.6183
200	-3.75951	100.0007
200	-10.0936	100.0007
200	-10.0936	517.3312
200	-50.0936	517.3312
220	0	61.89439
220	-1.78666	61.89439
220	-1.78666	400
220	-3.7711	400

220	-3.7711	100
220	-9.35194	100
220	-9.35194	284.0789
220	-49.3519	284.0789
240	0	82.94636
240	-2.40949	82.94636
240	-2.40949	219.193
240	-4.10826	219.193
240	-4.10826	111.7713
240	-7.746	111.7713
240	-7.746	626.3169
240	-47.746	626.3169
260	0	100.0047
260	-3.24005	100.0047
260	-3.24005	292.5165
260	-7.11736	292.5165
260	-7.11736	100.0049
260	-12.8138	100.0049
260	-12.8138	528.1939
260	-52.8138	528.1939
280	0	107.0242
280	-3.35219	107.0242
280	-3.35219	280.3293
280	-7.62645	280.3293
280	-7.62645	136.4681
280	-13.3808	136.4681
280	-13.3808	319.3878
280	-53.3808	319.3878
300	0	85.17467

300	-1.63324	85.17467
300	-1.63324	130.8855
300	-5.18034	130.8855
300	-5.18034	127.0795
300	-11.8572	127.0795
300	-11.8572	685.1593
300	-51.8572	685.1593
320	0	92.54917
320	-2.79342	92.54917
320	-2.79342	124.8412
320	-4.93216	124.8412
320	-4.93216	359.3378
320	-10.2448	359.3378
320	-10.2448	512.7072
320	-50.2448	512.7072

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metode MASW dapat mencitrakan keadaan bawah permukaan Tanggul LUSI dengan baik.
2. Dari hasil yang diperoleh, diketahui bahwa tanggul tersusun atas batuan pasir, lanau, lempung dan kerikil.
3. Pada Tanggul P76 - P77 ditemukan jalur Patahan Watukosek pada kedalaman sekitar 40 meter, Tanggul P79 - P82 ditemukan adanya anomali yang memiliki potensi menyebabkan penurunan tanah.
4. Pada Tanggul P77 - P79 dan P83 - P84 tidak ditemukan anomali yang berbahaya dan konstruksi tanggul masih baik.

5.2 Saran

Untuk menyempurnakan penelitian, maka diperlukan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu untuk mencoba menganalisa dengan menggunakan metode *inversi* yang lain untuk membandingkan hasil. Sehingga pada akhirnya akan didapatkan metode *inversi* yang paling cocok untuk menyelesaikan permasalahan pada metode MASW. Selain itu untuk monitoring tanggul LUSI sendiri, perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan metode geofisika yang lain agar didapatkan hasil yang lebih teliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Aki, K., Richards, P.G., 2002. Quantitative Seismology. University Science Books.
- Dal Moro, G., 2014. Surface Wave Analysis for Near Surface Applications. Elsevier Inc.
- Fernández-Martínez, J.L., García-Gonzalo, E., 2012. Stochastic stability and numerical analysis of two novel algorithms of the pso family: pp-gpso and rr-gpso. *Int. J. Artif. Intell. Tools* 21, 1240011. doi:10.1142/S0218213012400118
- Foti, S., Lai, C.G., Rix, G.J., Strobbia, C., 2014. Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization, 1 edition. ed. CRC Press, Boca Raton.
- Grandis, H., 2009. Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika. Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI), Jakarta.
- Lay, T., Wallace, T.C., 1995. Modern Global Seismology, Volume 58, 1 edition. ed. Academic Press, San Diego.
- Laby, D. Arung, 2016. Implementasi Algoritma RR-PSO yang Cepat, Stabil dan Robust untuk Inversi Dispersi Gelombang Rayleigh dan Vertical Electrical Sounding (Tugas Akhir). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Lowrie, W., 2007. Fundamentals of Geophysics, 2 edition. ed. Cambridge University Press, Cambridge ; New York.
- Martínez, J.L.F., Gonzalo, E.G., 2009. The PSO family: deduction, stochastic analysis and comparison.

- Swarm Intell. 3, 245–273. doi:10.1007/s11721-009-0034-8
- Martínez, J.L., García Gonzalo, E., 2008. The Generalized PSO: A New Door to PSO Evolution. *J. Artif. Evol. Appl.* 2008, 1–15. doi:10.1155/2008/861275
- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., Ivanov, J.M., 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Soc Explor. Geophys., Leading Edge (Tulsa OK)* 18, 1392– 1396.
- Pei, D., 2007. Modeling and inversion of dispersion curves of surface waves in shallow site investigations. UNIVERSITY OF NEVADA, RENO.
- Sungkono, 2011. Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Menggunakan Algoritma Genetik (Master Thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Sungkono, Santosa, B., 2011. Determine of Rayleigh wave dispersion using FGRT method. *Proceeding Int. Conf. Math. Sci. ICOMSc 2011.*
- Widyaningrum, Y., 2014. Inversi Dispersi Gelombang Rayleigh Menggunakan Quantum Particle Swarm Optimization Untuk Analisa Struktur Bawah Permukaan Tanggul Lumpur Sidoarjo (Master Thesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

BIODATA PENULIS



Yoseph Wahyu Saputra
Wisnu Wardana
(Wisnu) lahir di Madiun,
23 Maret 1993, putra
keempat dari empat
bersaudara dari pasangan
(alm) Yohanes Damaskus
Suripto dan (alm)
Veronika Sri Suyati.
Penulis menempuh
pendidikan formal di TK
St. Bernardus (1997-
1999), SDK St.
Bernardus Madiun (1999-
2005), SMP Negeri 1
Madiun (2005-2008),
SMA Negeri 2 Madiun

(2008-2011), hingga Perguruan Tinggi Negeri S-1 Jurusan Fisika ITS angkatan 2011 melalui jalur SNMPTN. Selama menjalani perkuliahan, penulis pun aktif dalam bidang organisasi mahasiswa yaitu Himpunan Mahasiswa Fisika ITS (Himasika ITS) dengan menjadi Staf Pengembangan Sumber Daya Manusia (PSDM) Periode 2012-2013, Ketua Biro Kaderisasi Departemen PSDM Periode 2013-2014. Penulis juga aktif dalam organisasi keprofesian di bidang Geofisika salah satunya adalah AAPG dengan menjadi Vice President. Selain itu, penulis juga menjadi Asisten Laboratorium Geofisika sejak tahun 2013. Dengan adanya laporan Tugas Akhir ini, penulis berharap akan adanya pengembangan penelitian tentang tanggul LUSI sendiri, karena sangat diperlukan monitoring demi mengantisipasi jatuhnya korban yang lebih lagi. Untuk keterangan lebih jelas mengenai Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui *e-mail* : **yosephwahyusww@gmail.com**