

BAB III

METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dipaparkan segala aspek yang berkaitan dengan proses penelitian, meliputi lokasi dan data penelitian, diagram alir penelitian, serta tahapan-tahapan dalam proses pengolahan data. Bab ini bertujuan untuk menjelaskan prosedur yang dilakukan dalam penelitian secara sistematis hingga mendapatkan hasil yang sesuai dengan tujuan awal penelitian.

3.1 Pengolahan Data Seismik Refraksi dan MASW

Dalam penelitian ini, data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari hasil pengukuran metode seismik serta data uji bor tangan. Sumber data tersebut berasal dari Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Data seismik yang digunakan sebanyak tiga titik lintasan dalam penelitian ini. Digunakan juga tiga titik data bor tangan di dekat titik lokasi penelitian, dengan kedalaman rata-rata sekitar tiga meter. Data bor tangan tersebut digunakan sebagai referensi pembandingan atau validasi terhadap hasil interpretasi dari pengolahan data seismik, sehingga dapat meningkatkan keakuratan dan reliabilitas dari hasil analisis yang akan dilakukan. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kondisi lapisan bawah permukaan di lokasi penelitian. Dalam tahapan pengolahan data, penelitian ini menggunakan perangkat lunak untuk mendukung proses analisis data yaitu perangkat lunak *SeisImager*.

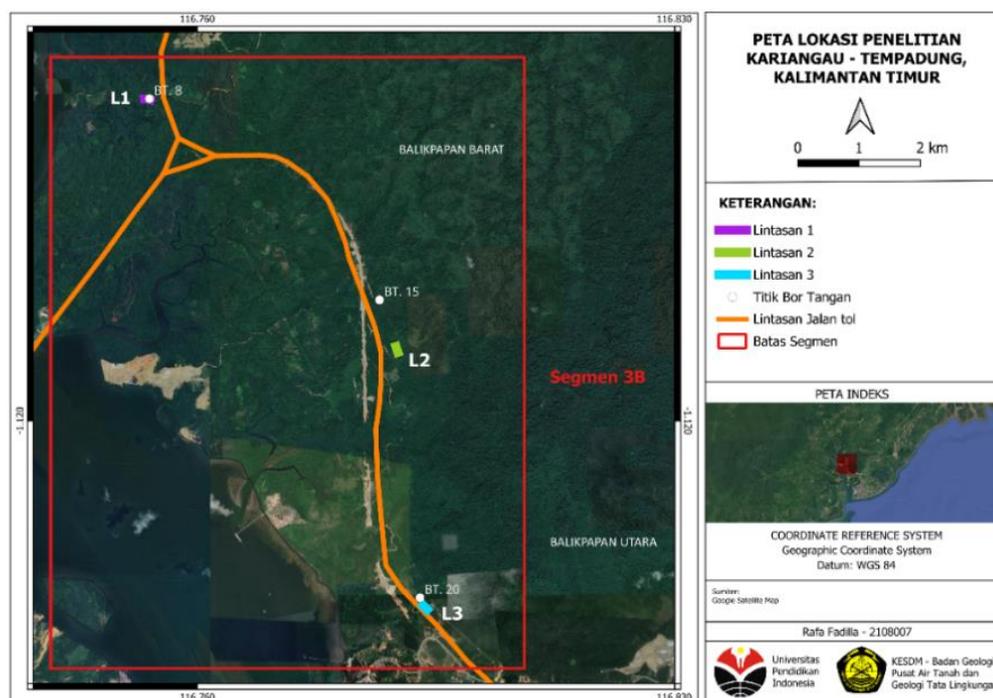
3.1.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini secara spesifik dilakukan di area Jalan Tol pada segmen 3B Kariangau - Tempadung, Provinsi Kalimantan Timur. Data yang digunakan merupakan data diakuisisi pada tahun 2024 dengan total tiga titik lintasan pengukuran yang akan digunakan dalam penelitian ini dengan masing-masing titik koordinat lintasan yang tertera pada Tabel 3. 1.

Tabel 3. 1 Koordinat lokasi penelitian

Lintasan	koordinat	
	Latitude	Longitude
1	116.752669°	-1.072430°
2	116.789276°	-1.109454°
3	116.793444°	-1.147607°

Ketiga titik lintasan tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan teknis dan geografis yang merepresentasikan kondisi geologi kawasan secara komprehensif. Lokasi dari titik-titik lintasan seismik tersebut berada di sekitar area jalur lintasan jalan tol, sehingga memungkinkan diperolehnya data yang relevan terhadap struktur bawah permukaan di sepanjang jalan tol seperti yang dapat dilihat pada peta lokasi penelitian pada Gambar 3. 1.



Gambar 3. 1 Peta lokasi penelitian

3.1.2 Pengolahan Data Seismik Refraksi

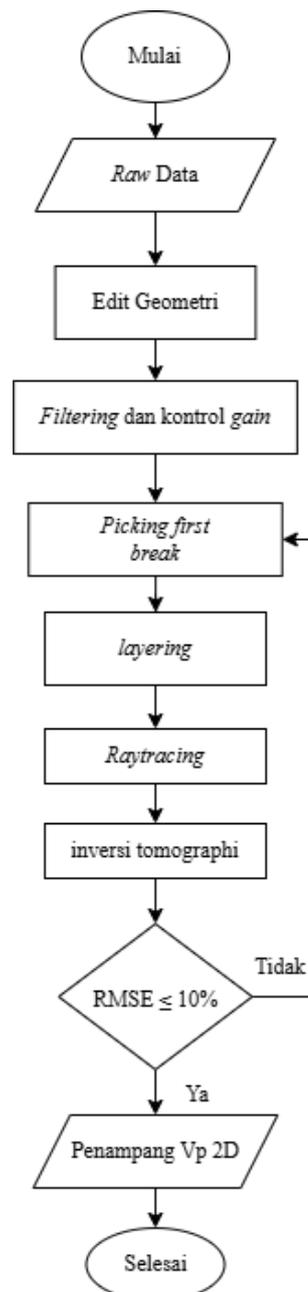
Metode seismik refraksi memanfaatkan energi seismik yang kembali menuju permukaan setelah gelombang yang berasal dari sumber dibiarkan (Kearey et al., 2013). Gelombang pertama yang diterima oleh *receiver* dari sumber seismik umumnya berupa gelombang langsung atau gelombang refraksi. Karakteristik

Rafa Fadilla, 2025

STUDI BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN METODE SEISMIC REFRAKSI DAN MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW) DI AREA JALAN TOL SEGMENT 3B KARIANGAU - TEMPADUNG, KALIMANTAN TIMUR

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

inilah yang menjadi dasar dalam metode seismik refraksi, yang berfokus pada gelombang datang pertama (*first arrival*). Pada penelitian ini, data mentah seismik diolah menggunakan perangkat lunak *SeisImager*. Melalui proses pengolahan menggunakan metode seismik refraksi ini, akan diperoleh nilai kecepatan gelombang-P (V_p). Data mentah seismik akan diolah melalui beberapa tahapan standar hingga mendapatkan profil penampang dalam bentuk 2D. Detail dari tahapan pengolahan data seismik refraksi tertera pada Gambar 3.2.

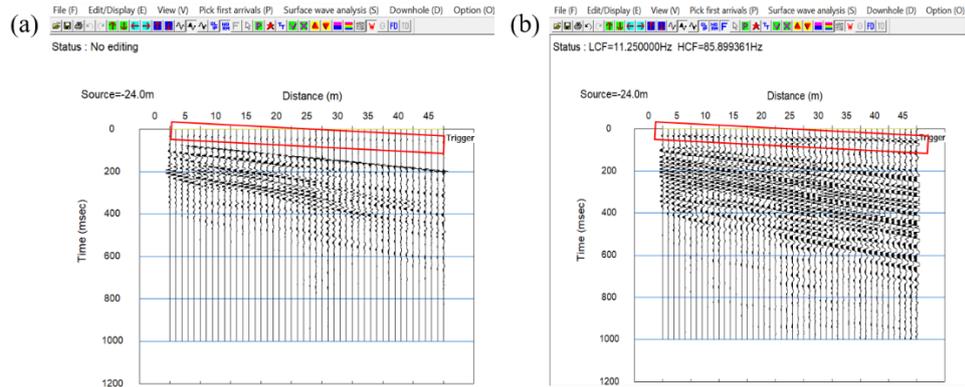


Gambar 3. 2 Diagram alir pengolahan data seismik refraksi

3.1.2.1 *Editing Geometri, Filtering, dan Kontrol Gain*

Tahap pertama adalah input data seismik dan dilakukan identifikasi terhadap posisi masing-masing geophone dan posisi sumber gelombang seismik (*source*) melalui proses *editing* geometri. Geometri diatur sesuai dengan konfigurasi akuisisi data di lapangan, seperti spasi atau jarak antar geophone dan posisi *source*. Selanjutnya dilakukan *filtering* dan kontrol gain yang berfungsi untuk memperbaiki kualitas sinyal dan mengurangi gangguan (*noise*) pada data. Data seismik sering kali terkontaminasi oleh berbagai jenis *noise* seperti getaran lokal atau distorsi amplitudo yang dapat menghalangi sinyal *firstbreak* yang dicari, sehingga perlu difilter dan distandarkan. Metode yang paling umum digunakan adalah *Bandpass Filter*, jenis filter yang frekuensinya berada di antara dua batas, diantaranya frekuensi batas bawah (*low cut-off*) dan frekuensi batas atas (*high cut-off*). *Bandpass Filter* merupakan gabungan antara *low pass filter* (LPF) dan *high pass filter* (HPF) Dalam penelitian ini, digunakan rentang 10–100 Hz, yang dianggap ideal untuk menangkap sinyal gelombang refraksi dari kedalaman sekitar ± 5 –50 meter (Yilmaz, 2001).

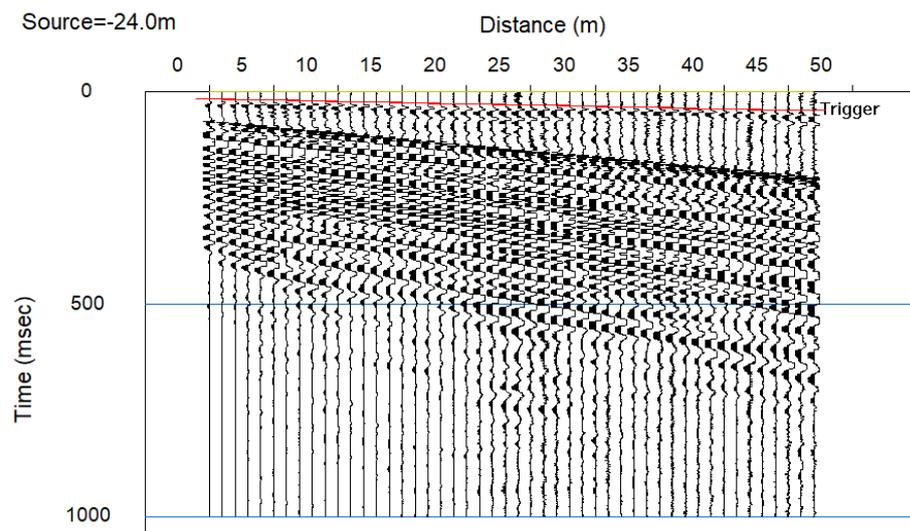
Kontrol gain adalah teknik untuk memperkuat sinyal yang lemah dan menormalisasi amplitudo agar perbedaan intensitas antara gelombang awal dan akhir tidak terlalu jauh. Kontrol gain ini digunakan untuk memberikan resolusi gelombang seismik yang lebih baik dan memudahkan saat akan melakukan *picking first break*. Gambar 3. 3 menunjukkan salah satu contoh data sebelum dan hasil *filtering* beserta kontrol gain. Dapat terlihat bahwa pada Gambar 3. 3 bagian (a) gelombang tiba pertama (*first arrivals*) yang ditunjukkan oleh kotak merah, kurang terlihat jelas karena amplitudo sinyal yang lemah dan *ground roll* (gelombang permukaan dengan frekuensi lemah) masih cukup dominan sehingga sinyal utama kurang jelas terlihat. Pada Gambar 3. 3 (b), gelombang tiba pertama (*first arrivals*) terlihat lebih jelas dan seragam pada tiap *trace* seismik sehingga lebih mudah melakukan identifikasi dan *picking* data.



Gambar 3. 3 Penampang seismik (a) sebelum proses *filtering* dan kontrol gain (b) sesudah proses *filtering* dan kontrol gain

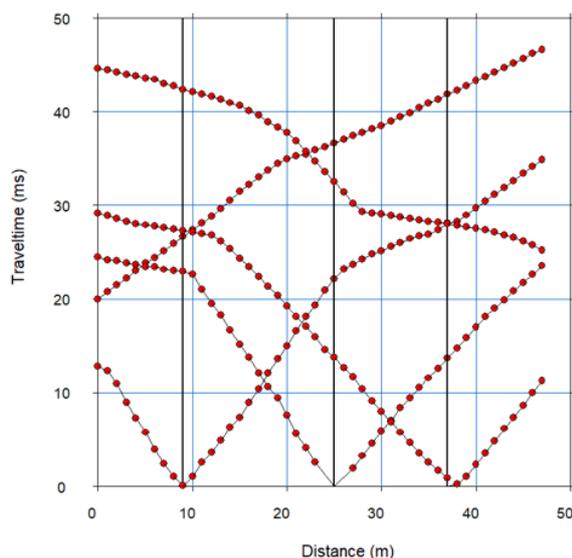
3.1.2.2 *Picking First break*

Tahap berikutnya adalah proses *picking first break*, yaitu penentuan waktu tiba pertama gelombang (*first arrival*). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, metode ini memanfaatkan gelombang datang pertama yang merupakan hasil dari pembiasan gelombang seismik oleh lapisan bawah permukaan. Proses ini dilakukan untuk memperoleh data observasi yang akan digunakan dalam tahap inversi untuk menghasilkan nilai kecepatan gelombang primer (V_p) pada kedalaman tertentu. Gambar 3.4 merupakan contoh hasil *picking first break* yang ditunjukkan dengan garis merah pada salah satu data seismik.



Gambar 3. 4 proses *picking first break* pada data seismik

Dari hasil *firstbreak* kemudian akan mendapatkan data *travel time* pada masing-masing data seismik. Data tersebut kemudian diplot menjadi bentuk kurva *travel time*. Hasil *travel time* tersebut kemudian akan dilakukan inversi menggunakan metode tomografi.



Gambar 3. 5 Hasil kurva travel time pada data seismik

3.1.2.3 Inversi Tomografi

Tomografi dalam seismik refraksi merupakan metode geofisika yang digunakan untuk memperkirakan distribusi kecepatan gelombang primer (V_p) di bawah permukaan berdasarkan data waktu tiba gelombang pertama (*first arrival time*). Teknik ini bergantung pada prinsip inversi waktu tempuh, yaitu proses mengubah data observasi (*travel-time*) menjadi model kecepatan dua dimensi yang merepresentasikan kondisi geologi bawah permukaan (Zang et al., 1998). Metode ini diawali dengan pembuatan model kecepatan awal, lalu dilakukan iterasi pelacakan sinar (*forward refraction raytracing*) melalui model yang akan dibuat dengan cara membandingkan waktu tempuh perhitungan dengan waktu tempuh pengukuran. Kemudian model dimodifikasi dan proses diulangi hingga perbedaan antara waktu perhitungan dan pengukuran mencapai nilai minimum. Iterasi yang digunakan adalah pendekatan *non linear least-squares* (Geometrics, 2009).

Tujuan utama dari proses ini adalah untuk menemukan nilai waktu tempuh minimum antara sumber dan penerima untuk setiap pasangan

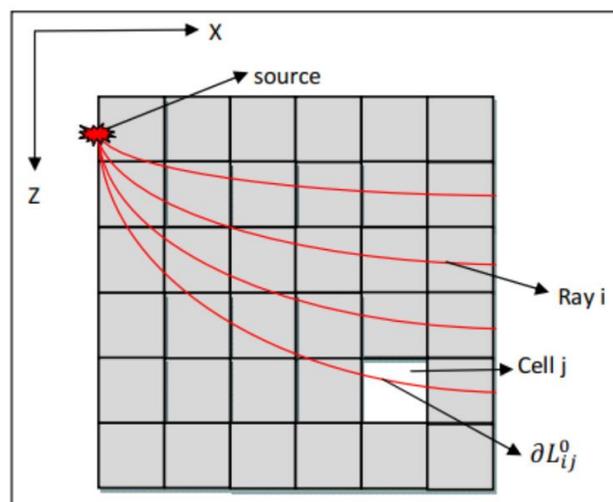
sumber-penerima. Persamaan umum yang biasa digunakan menyatakan hubungan antara waktu tempuh T_i dan perlambatan (*slowness*) di sepanjang jejak sinar (*raypath*).

$$T_i = \int_{L_i} s(\bar{x}(l)) dl \quad (3.1)$$

Dimana dl merupakan segmen sinar di sepanjang integrasi garis L_i (*raypath*) yang bergantung pada lokasi sumber, penerima, dan struktur kecepatan model. *Slowness* atau $s(\bar{x}(l))$ berbanding terbalik dengan kecepatan gelombang-P (v).

$$s = \frac{l}{v} \quad (3.2)$$

Persamaan tersebut termasuk kedalam persamaan non linear karena proses integrasinya sangat bergantung pada jalur lintasan gelombang yang melewati distribusi nilai *slowness* itu sendiri. Dengan kata lain, lintasan *ray* yang dilalui tidak diketahui sebelumnya dan berubah sesuai dengan model *slowness*. Oleh karena itu, pendekatan inversi linear hanya dapat diterapkan apabila hubungan antara waktu tempuh (T) dan *slowness* (s) dapat disederhanakan menjadi bentuk linear melalui pendekatan linierisasi lokal, misalnya dengan mengasumsikan perubahan kecil terhadap model awal.



Gambar 3. 6 Diagram penjalaran *raypath* yang terbentuk oleh sumber
(Dani et al., 2020)

Setiap sel memiliki panjang lintasan (*path length*) yang berbeda, ditandai dengan simbol ∂L_{ij}^0 . Berdasarkan persamaan (3.1), dapat diubah menjadi persamaan (3.3).

$$T_i = \int_{L_i} s_0(\bar{x}(l)) dl + \int_{L_i} \Delta s(\bar{x}(l)) dl \quad (3.3)$$

Berdasarkan prinsip Fermat, lintasan gelombang akan menyesuaikan untuk menghasilkan waktu tempuh minimum, sehingga perubahan waktu tempuh akibat gangguan kecil pada *slowness* dapat dihitung sepanjang lintasan awal L_i^0 , bukan yang baru. Maka, *delay time* atau perbedaan waktu tempuh antara model aktual dan referensi dapat dinyatakan secara mendekati persamaan (3.4).

$$\delta t_i = T_i - T_i^0 \approx \int_{L_i^0} \Delta s(\bar{x}(l)) dl \quad (3.4)$$

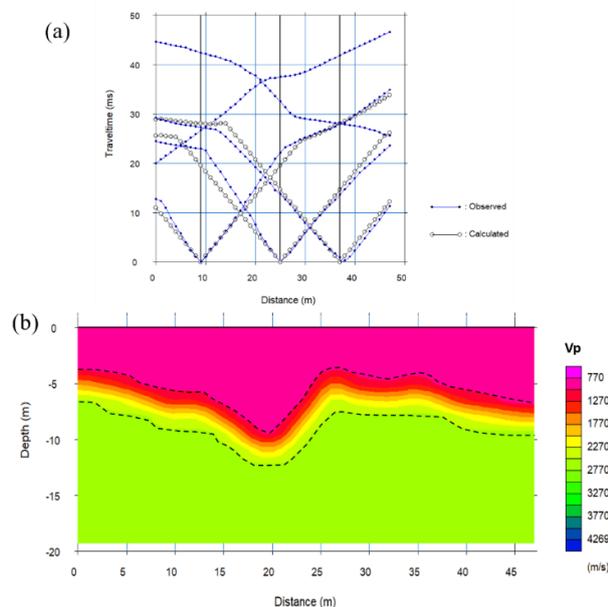
Dalam bentuk diskrit, *delay time* dapat ditulis dengan persamaan (3.5).

$$\delta t_i = \sum_{j=1}^M \delta s_j \partial L_{ij}^0 \quad (3.5)$$

Dengan M merupakan jumlah total sel dalam model, ∂L_{ij}^0 merupakan panjang segmen *raypath* dari *ray* i dan sel j dari model referensi. Gambar 3.6 menjelaskan bagaimana sebuah *raypath* dapat dibagi menjadi segmen-segmen kecil yang panjangnya bergantung pada ukuran selnya.

Selisih antara waktu tempuh hasil pengamatan di lapangan dan waktu tempuh yang dihitung dari model digunakan sebagai dasar untuk memperbarui nilai V_p pada setiap sel dalam model melalui proses inversi. Setelah nilai kecepatan diperbarui, sistem akan menghitung ulang waktu tempuh menggunakan metode *raytracing*. Hasil perhitungan ini dibandingkan kembali dengan data observasi untuk mengevaluasi perbedaannya. Selisih antara data hasil observasi dan hasil perhitungan ini diukur menggunakan nilai RMSE (Root Mean Square Error). Semakin kecil nilai RMSE, semakin akurat model dalam merepresentasikan kondisi bawah permukaan. Penetrasi gelombang seismik yang digunakan untuk mengkalkulasi nilai *traveltime* dalam inversi tomografi dikalkulasikan melalui *forward modeling* (Leung, 1997; Sheehan et al., 2005). Model

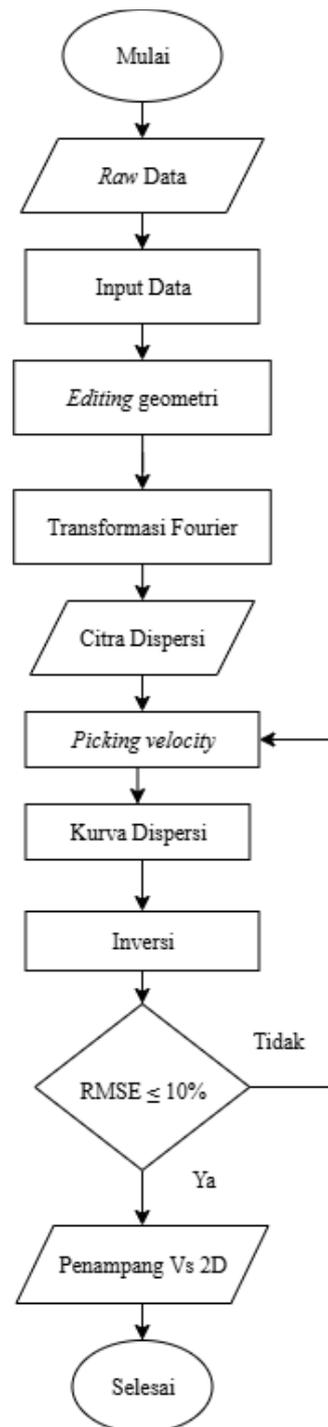
kecepatan yang dihasilkan bersifat diskrit (tersusun dari sel-sel), dan kemudian dikontur agar menghasilkan tampilan yang lebih halus dan mudah diinterpretasikan.



Gambar 3. 7 (a) Kurva *travel time* hasil perhitungan data seismik (b) Model penampang bawah permukaan hasil inversi tomografi

3.1.3 Pengolahan Data MASW

Pengolahan data MASW memanfaatkan sifat dispersi dari gelombang permukaan (Park et al., 1999). Gelombang permukaan yang digunakan dalam metode ini adalah gelombang *rayleigh* karena sangat berhubungan dengan kecepatan gelombang geser (V_S). Proses pengolahan metode ini terdiri dari empat tahap utama. Tahap pertama adalah analisis domain waktu, di mana waktu kedatangan gelombang permukaan diplot dan diidentifikasi berdasarkan jaraknya. Tahap kedua, analisis domain frekuensi, bertujuan untuk menentukan kedalaman setelah data ditransformasikan menggunakan Transformasi Fourier. Dalam proses ekstraksi kurva dispersi, kecepatan fasa dan frekuensi dipetakan menjadi kurva dispersi, yang kemudian diolah melalui proses inversi untuk memperoleh kecepatan gelombang geser (V_S). Detail dari tahapan pengolahan data MASW tertera pada Gambar 3. 8



Gambar 3. 8 Diagram alir pengolahan data MASW

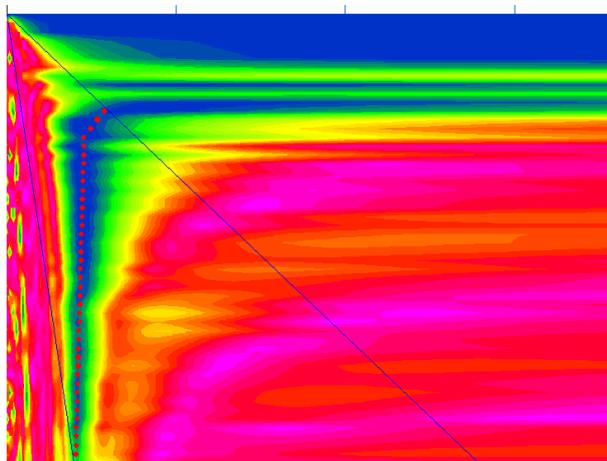
3.2.1.1 Analisis Sinyal

Tahapan pertama dalam proses pengolahan data MASW dimulai dengan *input* data per *shot* kedalam *software SeisImager*. Data berupa ekstensi SEG2 yang dikonversi dalam ekstensi dat. Selanjutnya dilakukan

editing geometri dengan menyesuaikan jarak, jumlah, dan posisi sumber (*source*) dan geofon sesuai dengan proses akuisisi data lapangan. Analisis sinyal gelombang *rayleigh* dilakukan dengan proses transformasi Fourier yang berfungsi untuk mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi dengan cara memecah sinyal menjadi komponen frekuensi yang berbeda dalam bentuk fungsi eksponensial kompleks. Setelah itu, akan didapat hasil kecepatan fasa-frekuensi (*phase velocity-frequency*).

3.2.1.2 Ekstraksi Kurva dan *Picking* Citra Dispersi

Citra dispersi dihasilkan dari analisis spektrum hasil pengolahan transformasi fourier dari domain waktu ke domain frekuensi. Citra dispersi memperlihatkan gambaran sebaran amplitudo dari sinyal-sinyal gelombang yang berasal dari data rekaman *multichannel*. Pembentukan citra dispersi diawali dengan mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi menggunakan Transformasi Fourier yang dilanjutkan dengan proses transformasi integral menggunakan metode pergeseran fase (*phase-shift method*) (Park et al., 1999).

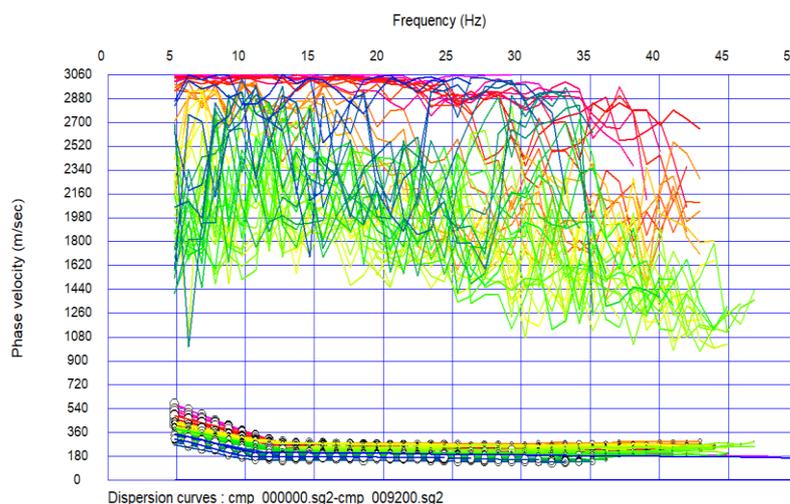


Gambar 3. 9 Spektrum citra dispersi

Hasil citra dispersi kemudian diperoleh kecepatan fasa-frekuensi (*phase velocity-frequency*) yang selanjutnya dilakukan *picking* untuk mendapatkan kurva dispersi. Proses *picking* dilakukan dengan menganalisis frekuensi dominan pada kurva antara kecepatan fasa dan frekuensi. Parameter yang di-*picking* merupakan trend sebaran energi amplitudo gelombang atau biasa disebut *fundamental mode* yang ditunjukkan dengan

titik-titik merah pada bagian berwarna biru di Gambar 3. 9 sebagai amplitudo dominan dari tiap-tiap data rekaman *multichannel*.

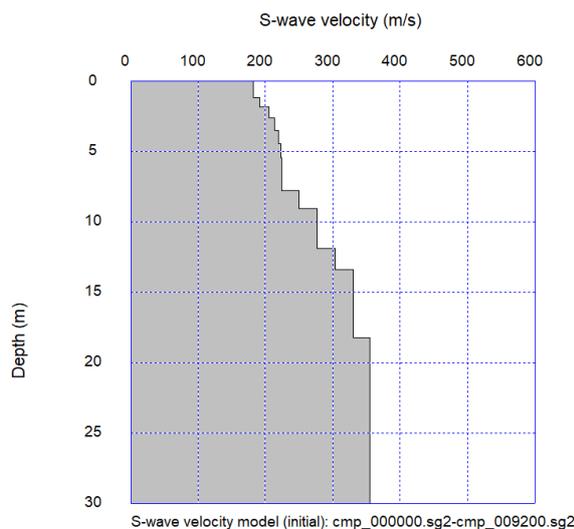
Selanjutnya akan diperoleh kurva dispersi. Kurva dispersi terbagi menjadi dua yaitu kurva dispersi eksperimental dan kurva dispersi teoritis. Kurva dispersi eksperimental ditampilkan sebagai grafik hasil *picking* antara frekuensi dan kecepatan fasa (*phase velocity*).



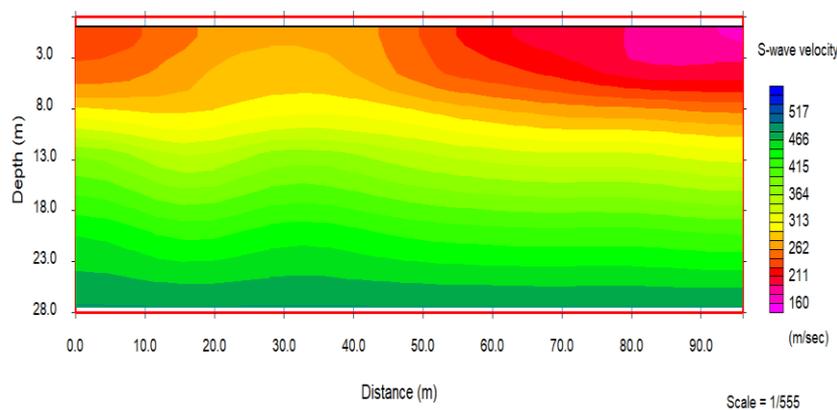
Gambar 3. 10 Kurva dispersi eksperimental dan kurva dispersi teoritis

3.2.1.3 Inversi

Inversi dilakukan dengan cara menyesuaikan model sintetik yang diperoleh dari *overlay* terhadap kurva teoritis dan kurva eksperimental. Prosedur dilakukan hingga kedua kurva tersebut didapatkan tumpang tindih terbaik atau bersesuaian satu sama lain pada rentang frekuensi yang telah ditetapkan selama proses *picking*. Inversi digunakan untuk menentukan profil kecepatan dengan tingkat kekakuan yang berbeda-beda. Hasil *overlay* antara kurva teoritis dan kurva eksperimental ditentukan dengan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*). Semakin kecil atau minimum nilai RMSE yang diperoleh maka hasil profil V_s yang dihasilkan mendekati atau sesuai dengan hasil yang sebenarnya. Jika nilai RMSE masih belum memenuhi batas minimum maka perlu dilakukan kembali proses *picking* citra dispersi. Hasil inversi yang diperoleh berupa profil V_s 1D seperti pada Gambar 3. 11. Kemudian dilakukan interpolasi dari tiap *shot gather* untuk memperoleh profil V_s 2D yang ditunjukkan pada Gambar 3. 12 (Park et al., 1999).



Gambar 3. 11 Profil V_s 1D hasil pengolahan MASW



Gambar 3. 12 Profil V_s 2D hasil pengolahan MASW

3.2 Pengolahan Nilai *Poisson's Ratio*

Nilai *Poisson's Ratio* diperoleh melalui perhitungan menggunakan Persamaan (2.20), dengan memanfaatkan nilai kecepatan yaitu V_p dan V_s untuk mendapatkan distribusi nilai *Poisson's Ratio* pada berbagai kedalaman dan memplot hasilnya kedalam profil 2D. Profil penampang 2D dari nilai *Poisson's Ratio* diolah menggunakan perangkat lunak *Golden Surfer*. Dalam perangkat lunak tersebut, data numerik *Poisson's Ratio* yang juga berisi nilai jarak serta kedalaman diimpor sebagai data grid yang selanjutnya akan dilakukan interpolasi dan pemodelan untuk menghasilkan profil 2D yang menggambarkan distribusi nilai *Poisson's Ratio* di lokasi penelitian. Hasil perhitungan dan profil 2D kemudian dianalisis dan diinterpretasi berdasarkan literatur pada Tabel 2.3. Nilai kecepatan gelombang primer (V_p) dan kecepatan gelombang geser (V_s) dapat digunakan untuk

mengetahui Tingkat elastisitas suatu material di bawah permukaan karena kedua jenis gelombang ini berhubungan langsung dengan sifat mekanik dan elastisitas material. Gelombang-P merupakan gelombang kompresi yang merambat melalui material dengan cara menekannya secara elastis. Sementara Gelombang-S merambat dengan cara mengubah bentuk material secara lateral atau menggeser material ke samping (Salim, 2012).

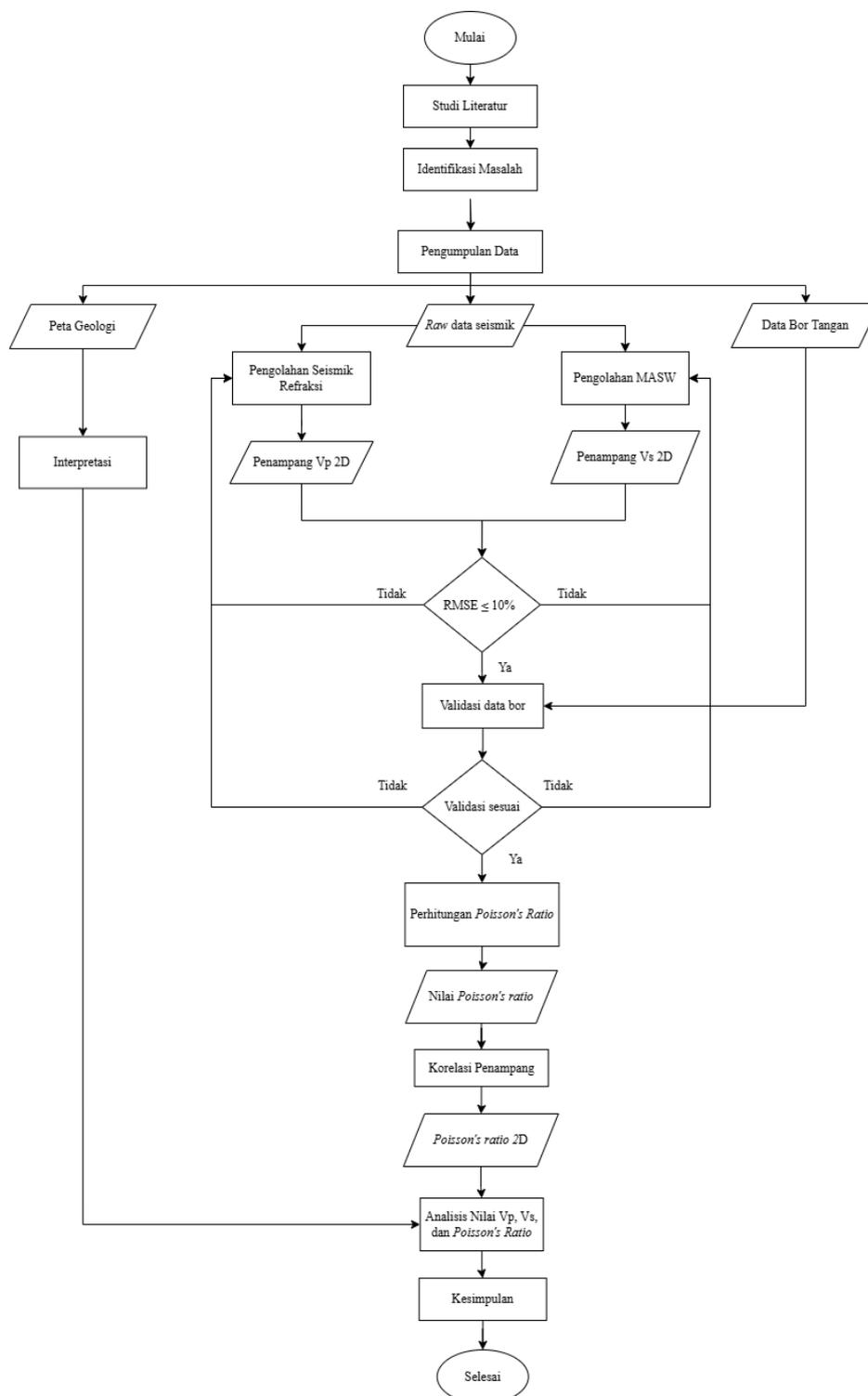
3.3 Analisis parameter V_p , V_s , dan *Poisson's Ratio*

Analisis implikasi dari studi bawah permukaan ini didasarkan pada hasil pengukuran kecepatan gelombang primer (V_p) yang diperoleh dari metode seismik refraksi, kecepatan gelombang geser (V_s) dari metode MASW, serta nilai *Poisson's Ratio*. Nilai *Poisson's Ratio* mencerminkan elastisitas dan sangat berguna untuk membedakan litologi batuan, menentukan tingkat kejenuhan fluida, serta mengidentifikasi zona berpotensi anomali seperti rekahan atau porositas tinggi. Analisis dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan visualisasi pada tiap lintasan V_p , V_s , dan *Poisson's Ratio*. Nilai-nilai parameter tersebut memberikan gambaran karakteristik fisis dan mekanik lapisan litologi bawah permukaan yang sangat penting dalam perencanaan dan pembangunan infrastruktur jalan tol. Nilai V_p yang rendah dapat mengindikasikan keberadaan lapisan tanah lepas atau jenuh air, sementara nilai V_s berperan penting dalam mengidentifikasi tingkat kekakuan dan stabilitas tanah. Kombinasi antara kedua parameter tersebut memungkinkan penghitungan *Poisson's Ratio* yang digunakan untuk mengevaluasi elastisitas dan potensi kompresibilitas tanah. Dengan demikian, implikasi dari studi ini dapat memberikan dasar dalam menilai kebutuhan perbaikan tanah serta resiko geoteknik seperti penurunan tanah atau kestabilan lereng di sepanjang trase jalan tol Segmen 3B Kariangau–Tempadung.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur yang relevan dengan penelitian tugas akhir, mencangkup penelusuran jurnal ilmiah, buku referensi, serta publikasi yang membahas karakteristik, konsep dasar, dan pendekatan yang berkaitan dengan topik penelitian. Setelah itu, mengidentifikasi masalah yang melatarbelakangi penelitian mengenai parameter nilai V_p , V_s , dan *Poisson's Ratio* untuk studi bawah permukaan yang menjadi dasar untuk menyusun rumusan

masalah, tujuan penelitian, dan batasan ruang lingkup penelitian. Penelitian dilanjutkan dengan pengumpulan dan pengolahan data dan hasilnya ditarik dalam bentuk kesimpulan yang mendukung tujuan awal dari penelitian. Seluruh proses ini dibuat dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Diagram alir penelitian