

BAB IV METODE PENELITIAN

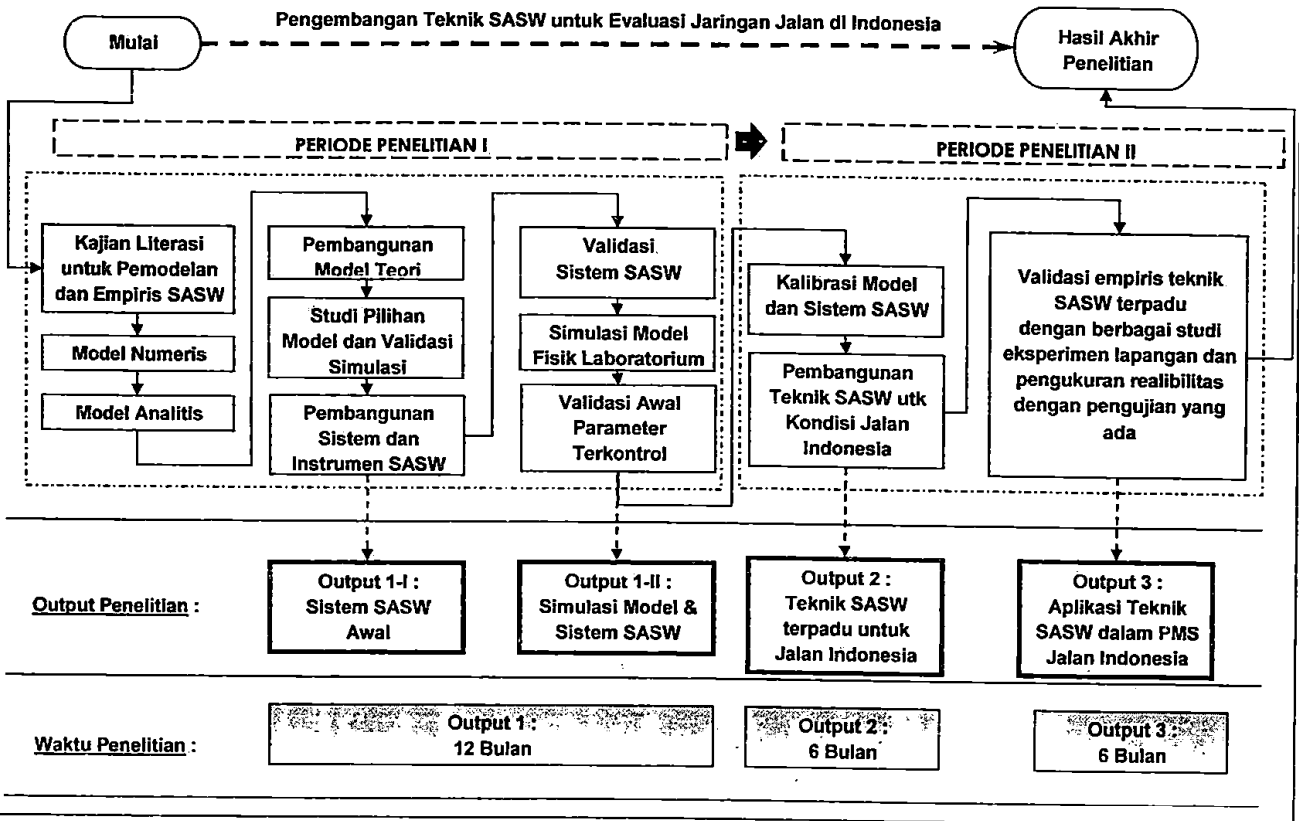
Untuk menjalankan penelitian ini digunakan dua tahapan utama dalam kerangka penelitian global sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 4.1. Tahapan pertama berisi pemodelan dan penyusunan sistem SASW awal, sedangkan tahapan kedua terdiri dari pembuatan model fisik, penilaian bahan model dan pengujian SASW ke atas model fisik. Satu kegiatan penelitian berupa validasi awal sistem SASW terpadu berbasis parameter ukur yang mempengaruhi sistem juga dilaksanakan dalam penelitian ini. Secara terperinci, kedua tahapan tersebut termasuk didalamnya penentuan parameter model, variabel penelitian, metode dan cara analisis yang digunakan dalam setiap tahapan dijelaskan berikut ini.

A. TAHAPAN PERTAMA PENELITIAN

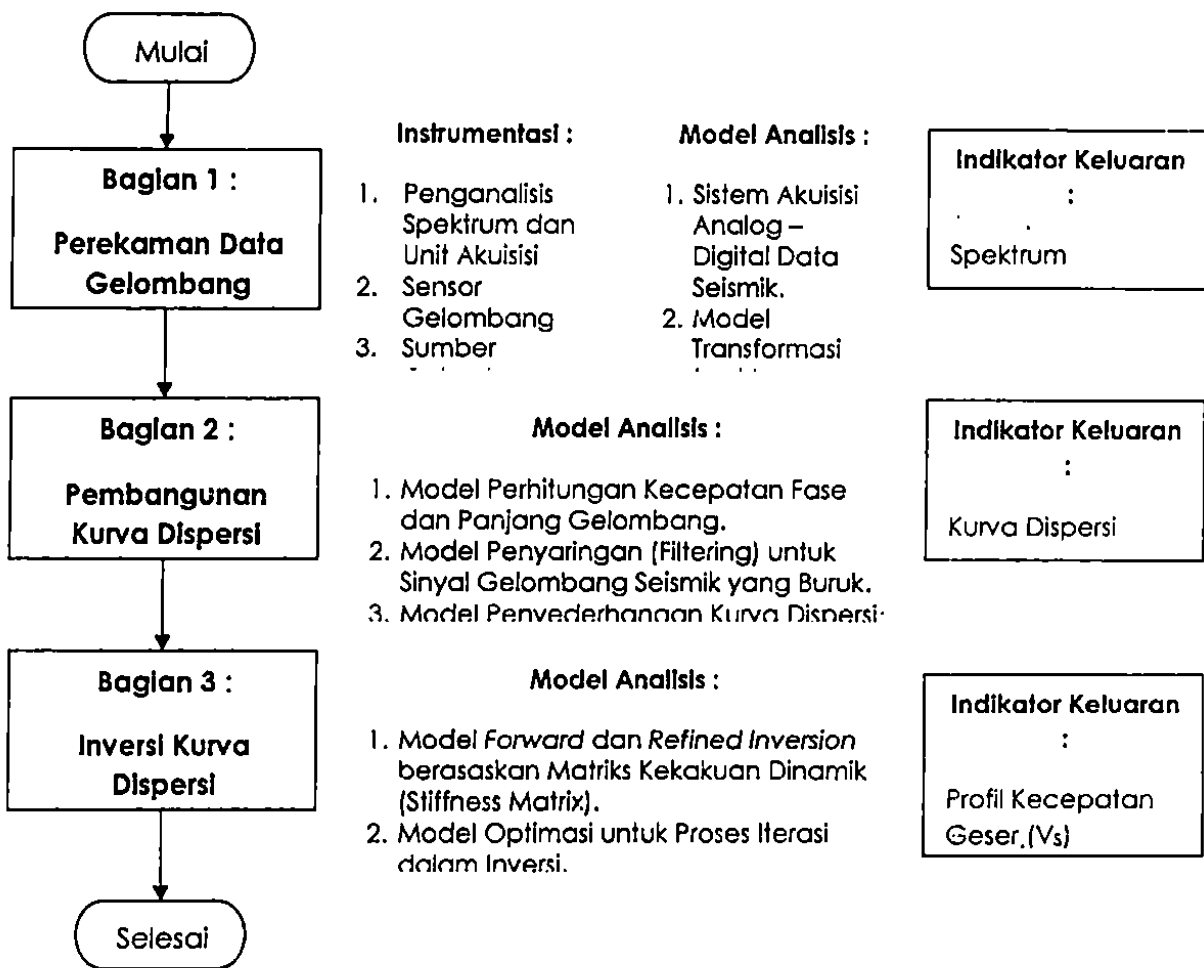
Dalam tahapan pertama ini, sistem SASW awal dihasilkan melalui susunan metodologi yang dijelaskan dalam Gambar 4.2. Tahapan ini mengandung tiga tahap analisis yaitu analisis perilaku perambatan gelombang permukaan R pada struktur jalan, analisis kurva dispersif kecepatan fase dan inversi untuk mendapatkan nilai modulus bahan jalan dan tahap analisis terakhir adalah kalibrasi, pemilihan instrumen dan penyusunan sistem SASW terpadu untuk pengukuran lapangan (Gambar 4.3).

1. Analisis Pertama: Analisis Perilaku Gelombang R pada Jalan

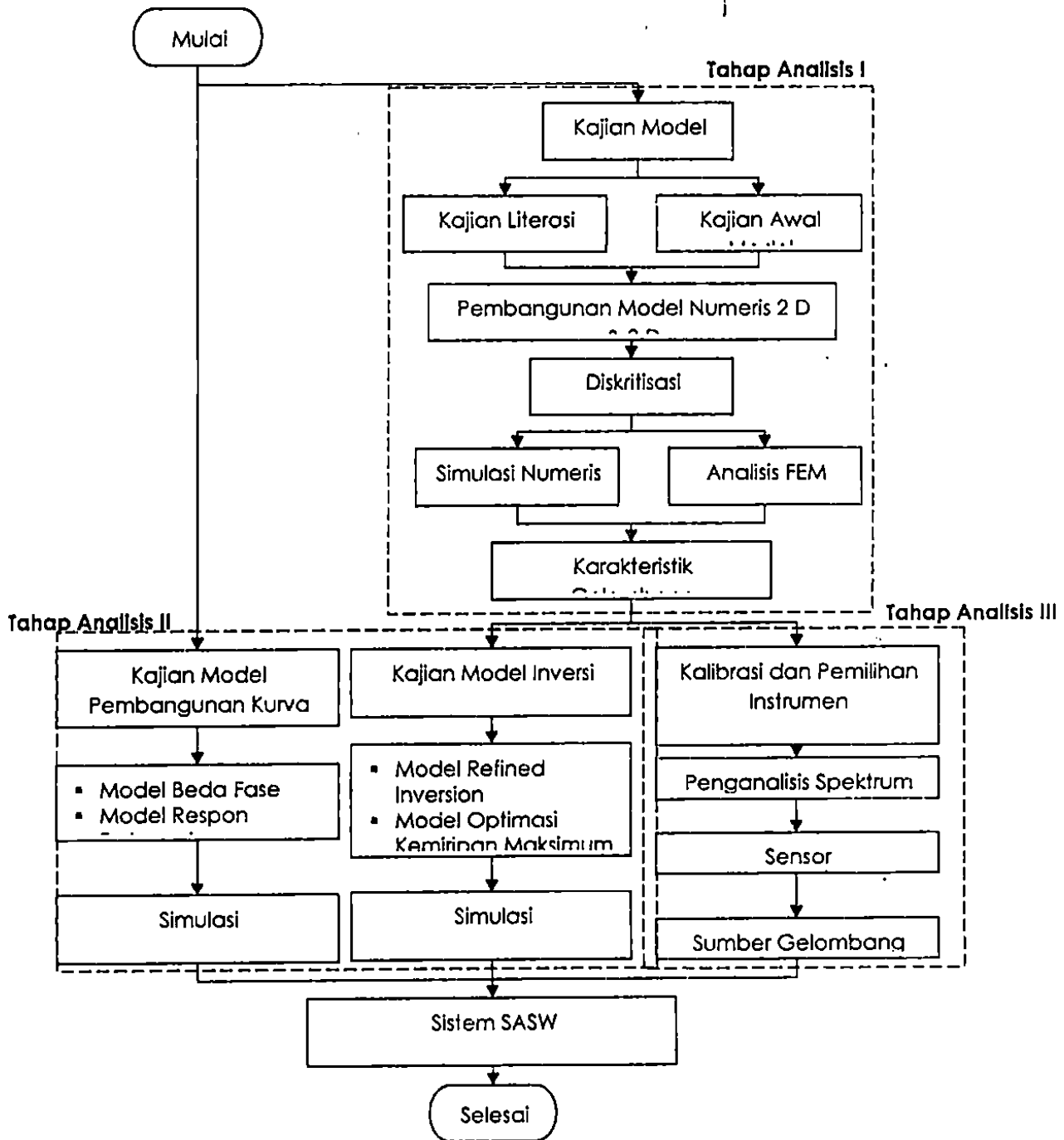
Pemodelan dimulai dengan kajian literasi terhadap model perambatan gelombang yang telah digunakan dalam analisis gelombang seismik yang merambat pada media padat. Selanjutnya disusun model numeris perambatan gelombang dalam 2 D dan 3 D berbasis metode matriks kekakuan dinamik (*dynamic stiffness matrix*). Persamaan dasar untuk perambatan model 2 D dan 3 D bagi lapisan permukaan jalan sebagaimana telah



Gambar 4.1. Kerangka Penelitian Global dalam Hibah Bersaing



Gambar 4.0. Sistem Analisis dalam Metode SASW

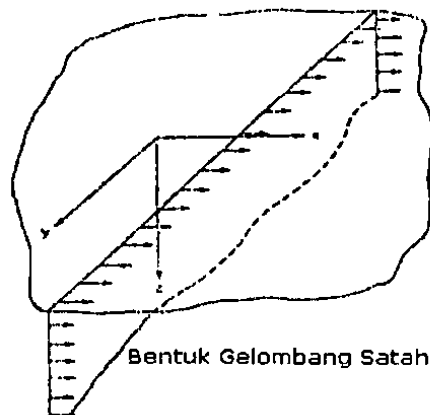


Gambar 4.3 Metode Penelitian untuk Menghasilkan Sistem SASW

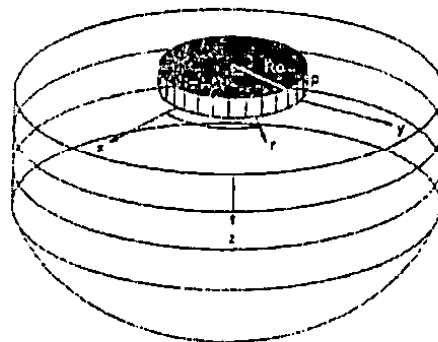
a. Bentuk Geometrik Model Spasial 2 D dan 3 D

Secara geometrik, model 2 D mengambil konsep bahwa gelombang seismik yang dihasilkan

arah perambatan horisontal searah perambatan gelombang (Gambar 4.4). Model 3 D dikonsepsikan sebagai media ruang setengah bulatan dengan permukaan lapisan teratas berbentuk lingkaran berkoordinat silinder (Gambar 4.5). Gelombang seismik yang dihasilkan oleh sumber mekanik yang diletakkan di pusat luasan, merambat pada arah radial sebagai fungsi horisontal dan berpenetrasi sebagai fungsi kedalaman.



Gambar 4.4 Model perambatan gelombang 2 D pada profil yang berlapis



Gambar 4.5 Model perambatan gelombang 3 Dimensi untuk media berlapis

b. Variabel Pemodelan

Variabel yang digunakan untuk melakukan pemodelan 2 D dan 3 D matrik kekakuan sebagai berikut:

1. Menilai konstanta nilai konstanta Lamé berdasarkan model elastis bahan atau bisa

2. Variabel masa jenis atau berat volume bahan penyusun lapisan perkerasan jalan dimulai dari lapisan permukaan, lapisan fondasi (fondasi atas maupun bawah) dan lapisan tanah dasar,
3. Variabel variasi tebal lapisan struktur perkerasan jalan,
4. Variabel karakteristik beban yang digunakan untuk menghasilkan gelombang dalam dominan frekuensi berdasarkan *bandwidth curve*,
5. Variabel nomor, mode dan panjang gelombang yang diasumsikan secara empiris,
6. Variabel kecepatan gelombang geser (V_s) yang diasumsikan untuk model perkerasan jalan atau nilai modulus elastisitas geser (G) dinamik. Karena data G dinamik empirik struktur jalan sukar untuk diperolehi, maka dalam penelitian ini digunakan data V_s struktur jalan yang diambil dari referensi penelitian sebelumnya (Rosyidi 2004 dan Rosyidi et al. 2004a, 2005a, 2006a, 2007a),
7. Variabel rasio peredaman (*damping ratio*) pada bahan penyusun struktur perkerasan.

c. Teknik Pemodelan dan Implementasi Komputer

Suatu pemrograman komputer diperlukan untuk menghitung kurva dispersif gelombang Rayleigh yang menggunakan implementasi pendekatan matrik kekakuan dinamik. Dalam penelitian ini, proses implementasi computer untuk menghitung model 2-D dan 3-D matrik kekakuan dinamik diberikan berikut ini:

- 1) Pada kondisi yang lebih praktis untuk menentukan secara lebih spesifik wilayah panjang gelombang manakah yang dihitung dalam kurva dispersif, program komputer digunakan untuk menentukan akar-akar (kecepatan yang jelas, *apparent velocity*, bergerak pada arah horizontal atau disebut sebagai kecepatan fase, *phase velocity*) untuk setiap panjang gelombang tertentu (λ) dan frekuensi yang seterusnya dihitung sebagai nilai $f = V/\lambda$.
- 2) Proses pencarian akar-akar ini dimulai dari nilai 0,80 kecepatan minimum gelombang geser (V_s) pada seluruh lapisan yang dikehendaki atau dimodelkan, dan kecepatan gelombang R untuk lapisan tak terhingga (ruang separa atau *half space*) yang memiliki property lapisan adalah kecepatan V_s maksimum. Bergantung kepada sistem lapisan dan panjang gelombang adalah dipertimbangkan bahwa akar yang dicari dapat berjumlah satu atau lebih akar. Penentuan determinasi matrik total (global) pada sistem berlapis adalah kompleks dan solusi tak nyata (*non real solution*) untuk kecepatan fase yang dapat

- 3) Perhitungan implementasi suatu beban disk (*disk load*) dari formulasi diskrit (Persamaan 2.22). Untuk setiap panjang gelombang yang diberikan, akar terkecil dari solusi 2-D (kecepatan fase dan frekuensi) digunakan untuk inisiasi model 3-D, yang mana frekuensi ditetapkan dan panjang gelombang dari model 2-D dijadikan nilai pendekatan awal. Dalam penerapan model diskrit ini terdapat *rule of thumb* (suatu anggapan) bahwa ukuran elemen harus berorder $\frac{1}{4}$ hingga $\frac{1}{6}$ panjang gelombang sehingga diperoleh suatu hasil yang lebih akurat dan dapat diterima. Untuk profil berlapis, nilai yang diberikan untuk lapisan tak terhingga $= 4\lambda$ dengan λ adalah panjang gelombang yang diperkirakan.
- 4) Beban disk yang diberikan dapat disimulasi dengan memulai menggunakan frekuensi 100 Hz dan beban disk vertikal pada 1 inch. Panjang gelombang awal bisa dimulai dengan memberikan nilai misalnya 9 feet dan simpangan gelombang dihitung pada lokasi sensor sebanyak 15 pada jarak yang telah ditentukan pada point 3 di atas. Suatu nilai kecepatan gelombang perlu diasumsikan sebagai nilai awal kekakuan bahan, misalnya bisa diambil 300 hingga 1500 m/s bergantung kepada jenis bahan yang diobservasi.
- 5) Pembangunan simulasi simpangan gelombang sepanjang permukaan media dalam bagian imajiner (*imaginary part*) dan nyata (*real part*). Perlu diamati bahwa simpangan gelombang pada poin awal merupakan simpangan vertikal rata-rata di bawah beban disk. Bagian nyata bersifat sebagai fungsi Bessel pada jenis pertama dan bagian imajiner berperilaku sebagai fungsi Bessel pada jenis kedua. Satu asumsi nilai rasio pelemahan (*damping ratio*) perlu dinyatakan untuk komputasi penyelesaian kontinu, dalam simulasi ini bisa dimasukkan nilai 2 hingga 4 %.
- 6) Berbasis dari hasil simulasi bagian imajiner dan nyata (bilangan kompleks), selanjutnya spektrum fase dalam domain spasial dan pergerakan gelombang dihitung pada lokasi sensor penerima gelombang dengan jarak sekitar $\frac{1}{4}$ panjang gelombang. Panjang gelombang dan kecepatan fase dihitung dari perbedaan fase antara sensor terakhir yang diletakkan 4 kali panjang gelombang dari sumber gelombang dan sensor yang diletakkan pada 2 kali panjang gelombang. Kondisi ini dipertimbangkan untuk mengurangi pengaruh pencampuran antara gelombang tubuh dan permukaan yang berada di dekat sumber gelombang atau dikenali sebagai pengaruh dekat permukaan (*near field effect*).
- 7) Jika dalam proses komputasinya penyelesaian model 2 D yang dihasilkan tidak berbeda melebihi 10 % dari penyelesaian 3 D, maka prosedur dihentikan; atau alternatif lainnya adalah proses diulang kembali dengan masukan nilai panjang gelombang baru sehingga mencapai konvergensi untuk frekuensi yang dibutuhkan.

8) Prosedur komputasi di atas diulang hingga keseluruhan frekuensi telah terpenuhi. Grid frekuensi dipengaruhi oleh penetrasi gelombang yang bergantung kepada frekuensi itu sendiri.

d. Output Pemodelan :

Dari tahapan pemodelan numeris dan analisis ini dihasilkan karakteristik dan perilaku simpangan (*displacement*) gelombang seismik dalam bagian nyata (*real*) dan imajiner (*imaginary*). Karena memiliki nomor kompleks, maka karakteristik simpangan ini dapat ditransformasikan kepada dalam fungsi magnitude dan fase. Variasi fase terhadap jarak pengamatan dari sumber gelombang (spektrum fase dalam domain spasial) dapat diplotkan dalam fungsi fase berunit derajat tertutup (-180° dan $+180^\circ$).

Dari hasil di atas, selanjutnya kurva dispersi kecepatan fase terhadap frekuensinya dapat dibangun. Kurva dispersi yang diperoleh digunakan dalam proses penyesuaian (*fitting*) terhadap kurva dispersi eksperimen dalam analisis inversi yang merupakan tahapan analisis akhir dalam sistem SASW untuk mendapatkan profil perkerasan yang diuji.

e. Instrumen Pemodelan :

Dalam tahap analisis ini, beberapa perangkat lunak (*software*) diperlukan untuk membantu proses komputasi algoritma dan presentasi hasil simulasi. Beberapa perangkat lunak yang dipergunakan sebagai instrumen pemodelan ini adalah:

1. Software Matlab versi 7.0 untuk model numeris dan aplikasi penurunan algoritma matrik kekakuan pada model 2 D dan 3 D.
2. Software Autosignals untuk analisis wavelets bagi gelombang permukaan R.
3. Software dBFA32 untuk analisis awal data digital gelombang kepada spektrum.
4. Software Plaxis untuk Model Analitis FEM.

2. Analisis Kedua: Pembangunan Kurva Dispersi Eksperimen

Kurva disperse eksperimen adalah bagian terpenting dalam analisis profil suatu lokasi pengujian dari analisis spektrum data gelombang permukaan. Kurva ini memberikan

permukaan yang melalui suatu media yang berlapis. Untuk mendapatkan kurva dispersi ini diperlukan dua bagian analisis dan perhitungan yaitu analisis penyaringan (*filtering*) spektrum fase; perhitungan V_{PH} dan fb ; dan penyederhanaan kurva dispersi. Berikut ini dijelaskan prosedur atau tata cara dan metode analisis yang digunakan untuk mendapatkan kurva dispersi.

a. Metode Analisis Penyaringan Spektrum Fase:

Langkah dan metode analisis yang digunakan dalam penyaringan spektrum fase dijelaskan dalam Gambar 4.6. Adapun metode analisisnya diberikan dalam penjelasan ringkas berikut ini:

1). *Impulse Response Filtration (IRF)*

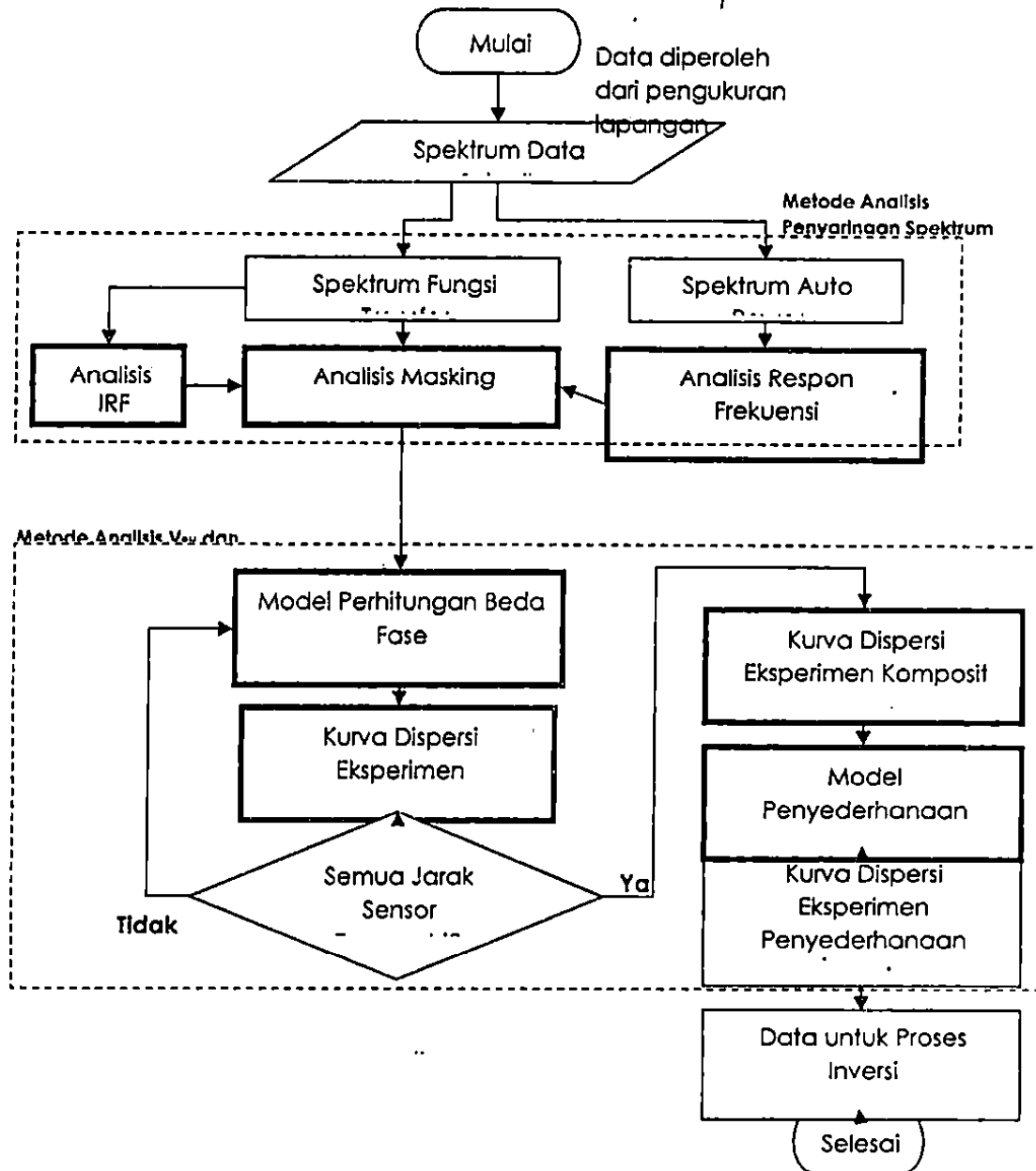
Impulse Response Filtration (IRF) dalam metode SASW merupakan metode yang digunakan untuk menyaring adanya fenomena gelombang pantulan. Proses penyaringan gelombang ini dapat dibedakan menjadi dua pilihan, yaitu mode tinggi (*high mode*) dan mode rendah (*low mode*) yang kemudian dapat disesuaikan dengan media yang digunakan, yaitu *geotechnical site*, *concrete site* dan *pavement site*. Menurut Rosyidi (2004), prosedur pengambilan data gelombang R yleigh melalui metode IRF dilakukan dengan urutan sebagai berikut:

1. Perhitungan gelombang pantulan dari suatu fungsi pindahan untuk kedua sensor menggunakan perhitungan:

$$h(t) = \int H_{yx}(f) e^{i2\pi ft} dx \quad (4.1)$$

dengan:

$h(t)$: gelombang pantulan



Gambar 4.6 Skematik Alur Pemodelan dalam Pembangunan Kurva Dispersi

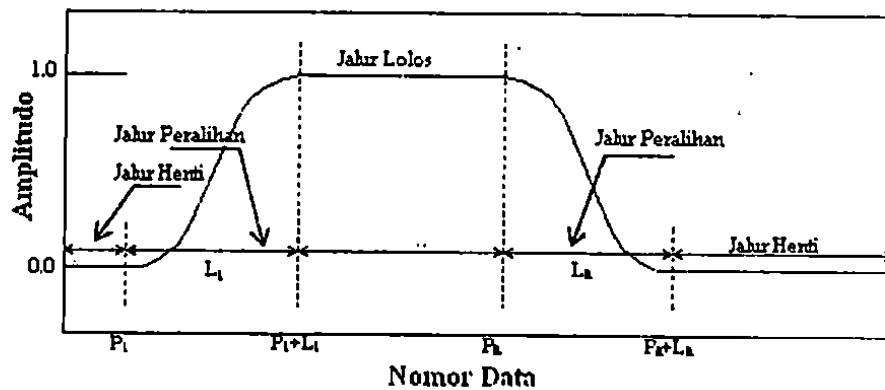
2. Penggunaan spektrum *Gabor* (*gabor spectrum*) sebagai kombinasi linier antara fungsi masa dan frekuensi (Dziewonski et al., 1969). Ini berguna untuk mendapatkan *time window* pada gelombang pantulan. Perhitungan untuk mode tinggi dan rendah dapat diperoleh dari persamaan matematik sebagai berikut:

$$f(n) = \begin{cases} 1, & 1 \leq n < P_l \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right) & P_l \leq n < P_l + L_l \\ 0, & P_l + L_l < n < P_h \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right), & P_h \leq n < P_h + L_h \\ 1, & P_h + L_h < n \leq N \end{cases} \quad (4.2)$$

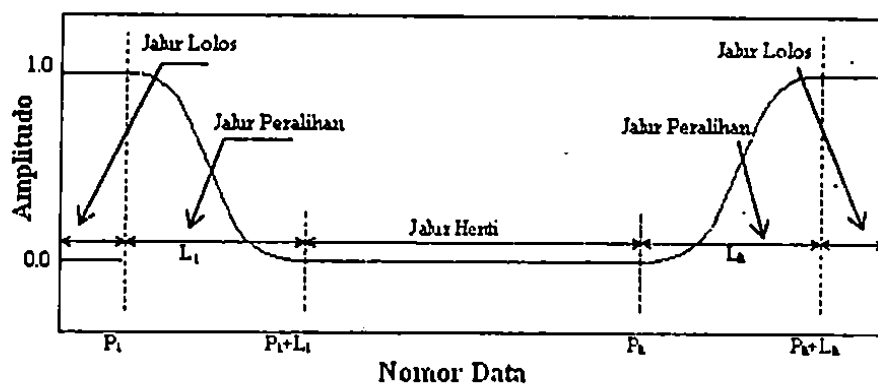
$$f(n) = \begin{cases} 0, & 1 \leq n < P_l \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{P_l + L_l - n}{L_l} \pi + 1 \right) & P_l \leq n < P_l + L_l \\ 1, & P_l + L_l < n < P_h \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right), & P_h \leq n < P_h + L_h \\ 1, & P_h + L_h < n \leq N \end{cases} \quad (4.3)$$

dalam penyaringan gelombang menggunakan tiga jalur, yaitu jalur lolos (*passband*), jalur perpindahan (*transition band*), dan jalur henti (*stopband*) (Gambar 4.7). Jalur lolos merupakan garis berbentuk datar yang mempunyai nilai 1 yang dirancang untuk meloloskan gelombang yang diterima, sedangkan jalur henti memiliki nilai 0, dimana jalur ini disusun untuk menghilangkan gelombang yang datang berikutnya. Jalur perpindahan adalah jalur berbentuk runcing kosinus (*cosine-tapered*) yang dirancang untuk memberikan perpindahan yang halus antara *passband* dengan *stopband*.

3. Pemindahan spektrum fungsi semula (*original*) ke dalam spektrum fungsi *backbone* dan spektrum fungsi perbaikan (*enhance*) dari data gelombang pantulan yang telah disaring
4. Pembukaan (*unwrapping*) spektrum fungsi perpindahan ke dalam mode rendah ataupun mode tinggi. Spektrum akhir terbentuk dari penggabungan antara mode rendah dan mode tinggi yang boleh dipisahkan berdasarkan nilai frekuensi jalur perpindahan (*transition band*). Untuk frekuensi yang digunakan di bawah frekuensi mode perpindahan maka menggunakan mode rendah dan apabila frekuensi yang digunakan di atasnya maka menggunakan penyaringan untuk mode tinggi. Untuk memudahkan pemilihan mode ini, Rosyidi (2004) dan Rosyidi et al. (2007)



(a)



(b)

Gambar 4.7 Skema jalur dalam metode IRF, (a) menggunakan mode rendah, (b) menggunakan mode tinggi

Selain hal tersebut, Rosyidi (2004) juga menyatakan bahwa mode rendah biasanya digunakan untuk mendapatkan data pada lapisan fondasi dan lapisan tanah dasar dari perkerasan jalan, data gelombang yang diambil dalam mode rendah ini bukan merupakan data gelombang yang pertama kali diterima oleh sensor. Untuk mode tinggi data gelombang yang diambil adalah beberapa kelompok gelombang yang pertama kali diterima oleh sensor (sesuai fungsi waktu kedatangan) baik dari perambatan gelombang tubuh, pantulan gelombang maupun gelombang permukaan.

2). Analisis Respon Frekuensi (Frequency Response Analysis)

Analisis ini digunakan untuk menentukan wilayah frekuensi yang sesuai untuk setiap wilayah kecepatan fase yang terhitung. Analisis ini didasarkan penentuan nilai frekuensi dari puncak spektrum auto power yang menunjukkan amplitudo tertinggi atau dikenal sebagai metode *bandwidth*. Nilai rentang frekuensi ini digunakan untuk mengelompokkan kecepatan fase prediksi dalam spektrum fungsi transfer untuk setiap karakteristik bahan lapisan perkerasan jalan. Nilai rentang frekuensi diperoleh menggunakan persamaan:

$$A_{12} = \frac{A_{puncak}}{\sqrt{2}} \begin{cases} f_1 = g(A_1) \\ f_2 = g(A_2) \end{cases} \quad (4.4)$$

dengan :

A_{puncak} : Nilai amplitudo maksimum pada suatu spektrum auto

f_1 : Nilai frekuensi respon minimum dari fungsi amplitudo pada suatu rentang

f_2 : Nilai frekuensi respon maksimum dari fungsi amplitudo pada suatu rentang

Variabel pemodelan yang digunakan adalah data amplitudo dan frekuensi dari spektrum auto-power pada setiap konfigurasi pengukuran lapisan perkerasan jalan. Keluaran analisis ini digunakan untuk pertimbangan proses *masking* dan penyaringan (*filtering*) spektrum fungsi transformasi.

3). Analisis penyaringan gelombang (Masking)

Proses penyaringan data dilakukan untuk mendapatkan sinyal yang baik dan merupakan prosedur penafsiran spektrum fase terbuka. Prosedur penyaringan yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut (Rosyidi, 2004):

1. Penyaringan dilakukan untuk bagian sinyal yang berkualitas buruk. Informasi mengenai sinyal yang berkualitas buruk tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan data sudut fase (ditampilkan dalam spektrum fungsi pindahan) yang tidak memenuhi ketentuan umum dalam grafik dan memiliki kaitan fase antar kedua sensor (ditampilkan dalam spektrum fungsi koheren) yang memiliki nilai koheren

2. Penyaringan bagian panjang gelombang yang dipengaruhi oleh efek sekitar permukaan dekat (*near field effect*) pada spektrum fase yang ditentukan berdasarkan persamaan:

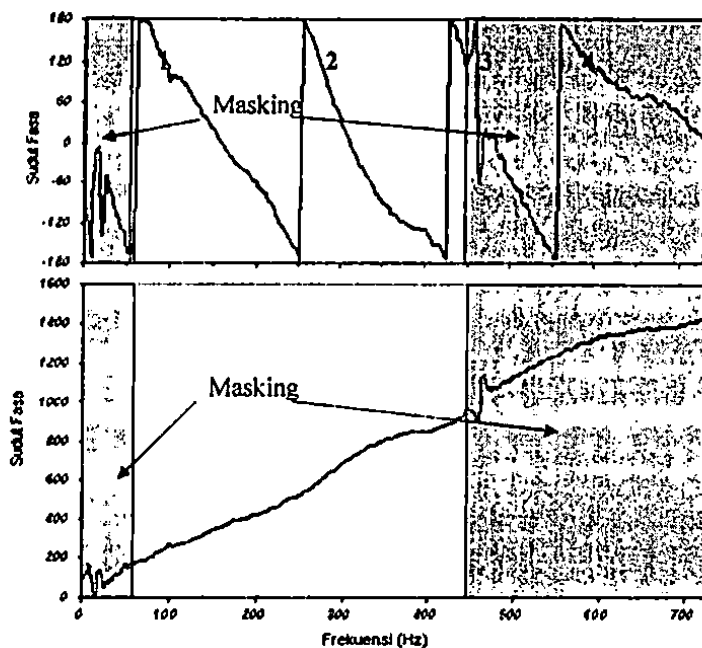
$$\lambda \leq \frac{1}{2} d_1 \quad (4.5)$$

dengan:

λ : panjang gelombang

d_1 : jarak antara pemukul dengan sensor pertama

Untuk penyaringan panjang gelombang maksimum menggunakan kriteria penyaringan oleh Heisey (1982), yaitu gelombang dengan panjang lebih besar daripada tiga kali jarak sensor tidak perlu diperhatikan. Gambar 4.8 di bawah ini menampilkan suatu proses penyaringan dilakukan di atas spektrum fungsi pindahan untuk data yang tidak dikehendaki.



Gambar 4.8 Contoh proses penyaringan (*masking*) untuk data tak dikehendaki

3. Dalam penentuan kurva kecepatan fase diperlukan perkiraan jumlah siklus (*cycle number*) yang benar pada spektrum fungsi pindahan atau *cross power* tertutup (*wrapping*). Jumlah putaran ini digunakan sebagai pembanding bagi bentuk spektrum fase terbukanya (*unwrapping phase spectrum*). Pada bentuk spektrum yang jelas, bilangan jumlah banyaknya siklus yang benar boleh ditentukan dengan membandingkan pengukuran spektrum fungsi pindahan terbuka jarak sensor terkini dengan yang sebelumnya. Jumlah

siklus yang tidak mewakili sampel jarak sensor yang ditentukan boleh disaring atau ditiadakan.

b. Metode Beda Fase (*Phase Different Method*) untuk Kurva Dispersi

Model ini digunakan dengan pertimbangan bahwa metode ini telah digunakan secara meluas untuk menghitung kecepatan gelombang menggunakan parameter waktu pergerakan gelombang. Waktu pergerakan gelombang (t) dapat dihitung menggunakan nilai beda fase (ϕ) dari spektrum gelombang fungsi transfer (*transfer function*) melalui proses FFT data seismik gelombang. Persamaan dasar metode ini dijelaskan sebagai berikut:

$$\phi = 2\pi f_0 t \quad (4.6)$$

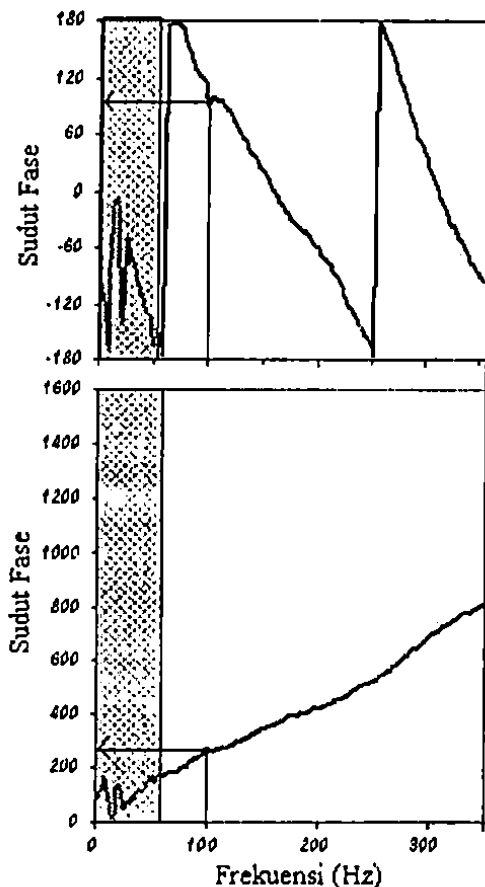
$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \quad (4.7)$$

$$V_{PH} = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (4.8)$$

dengan :

f_0 = frekuensi, d = jarak antar sensor pengesan gelombang dan V_{PH} = kecepatan fase gelombang.

Dari hasil analisis ini didapatkan kurva dispersi eksperimen individu (kecepatan fase dan frekuensi gelombang) dan selanjutnya disusun menjadi kurva dispersi eksperimen komposit untuk seluruh data jarak sensor yang didapatkan dari pengujian lapangan. Gambar 4.9 di bawah ini menunjukkan suatu contoh perhitungan yang digunakan untuk menentukan



- ⇒ Frekuensi (f) = 100 Hz
- ⇒ Sudut Fase = $\phi = 90.58^\circ$
- ⇒ Jarak di antara sensor = 80 cm

1. Perhitungan sudut fase terbuka (unwrapping)

$$\phi = 180^\circ + (180^\circ - 90.58^\circ) = 269.41^\circ$$

2. Waktu perambatan gelombang R

$$t = \frac{269.41^\circ}{2\pi 100} = 0.007484 \text{ detik (s)}$$

3. Kecepatan fase (gelombang R)

$$V_{RH} = \frac{0.8}{0.007484} = 106.89 \text{ m/s}$$

4. Panjang gelombang Rayleigh

$$\lambda = \frac{0.8}{\frac{269.41^\circ}{2\pi}} = 1.07 \text{ m}$$

Gambar 4.9 Contoh perhitungan kecepatan fase (gelombang R) dari spektrum sudut fase

c. Model Penyederhanaan Kurva Dispersi

Model ini digunakan untuk menyederhanakan kurva dispersi eksperimen komposit. Penggunaan model penyederhaan ini dipertimbangkan kerana jumlah data yang dihasilkan oleh spektrum fungsi transfer adalah 3200 digit pada setiap kurva dispersi eksperimen individu. Hal ini menyebabkan jumlah data pada kurva dispersi komposit bisa mencapai 18.000 digit. Jumlah data yang sedemikian besar mengakibatkan lambatnya proses komputasi iterasi pada tahapan inversi dalam analisis SASW. Kurva dispersi komposit sebaiknya memiliki 20 hingga 50 data saja untuk proses analisis inversi yang baik. Oleh sebab itu, kurva dispersi komposit harus disederhanakan menjadi kurva dispersi eksperimen rata-rata yang memiliki data kecepatan fase antara 20 hingga 50 titik frekuensi saja. Metode perata-rataan untuk menyederhanakan data kurva dispersi yang digunakan dalam penelitian ini merujuk kepada rekomendasi oleh Rix (1987), Nazarian dan Desai (1993), Joh (1996) dan Rosyidi (2004) untuk aplikasi seismik di struktur tanah dan perkerasan jalan. Algoritma yang

dengan penyesuaian persamaan kurva dispersi untuk nilai polinomial terbaik (*polynomial best-fit*).

Tahapan untuk proses rata-rata data kecepatan dalam kurva penyebaran dijelaskan sebagai berikut (Rosyidi, 2004):

1. Kurva penyebaran dibagi menjadi bagian yang lebih kecil. Untuk memperoleh penyebaran data yang cukup pada panjang gelombang yang pendek maka nilai r (*constant increment ratio*) dapat digunakan. Nilai r dalam data yang diperoleh dinyatakan dalam :

$$D_{j+1} = r \cdot d_j \quad (4.9)$$

Jika jumlah titik yang diinginkan untuk kurva penyebaran rata-rata adalah n , maka panjang gelombang titik ke- i diperoleh dari :

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{i,a} + \lambda_{i,b}}{2} \quad (4.10)$$

dimana $\lambda_{i,a}$ dan $\lambda_{i,b}$ adalah panjang gelombang ke depan dan belakang bagian ke- i , sehingga d_i dapat dinyatakan sebagai :

$$d_i = \lambda_{i,b} - \lambda_{i,a} \quad (4.11)$$

dengan, panjang gelombang ke depan dan belakang ditentukan dari :

$$\lambda_{i,a} = \lambda_{\text{minimum}} + (\lambda_{\text{maksimum}} - \lambda_{\text{minimum}}) \cdot \frac{r^{i-1} - 1}{r^{n-1} - 1} \quad (4.12)$$

$$\lambda_{i,b} = \lambda_{\text{minimum}} + (\lambda_{\text{maksimum}} - \lambda_{\text{minimum}}) \cdot \frac{r^i - 1}{r^{n-1} - 1} \quad (4.13)$$

dengan λ_{minimum} dan $\lambda_{\text{maksimum}}$ diperoleh dari data kurva penyebaran penelitian untuk

2. Pengukuran panjang ruas kurva penyebaran pengujian gabungan yang digunakan untuk menilai kecepatan bagi panjang gelombang bagian i . Panjang ruas $|S_i|$ ditentukan sebagai nilai konstan pada skala logaritma :

$$|S_i| = \frac{\log \lambda_{maksimum} - \log \lambda_{minimum}}{k} \quad (4.14)$$

dengan k adalah jumlah ruas yang dikehendaki dengan batas kiri dan kanan ruas ditentukan sebagai :

$$S_{i(kiri)} = \lambda_i \cdot 10^{-|S_i|/2} \quad (4.15)$$

$$S_{i(kanan)} = \lambda_i \cdot 10^{-|S_i|/2} \quad (4.16)$$

Kecepatan untuk λ_i yang terletak dalam interval:

$$S_{i(kiri)} \leq \lambda < S_{i(kanan)} \quad (4.17)$$

- 3 Menjalankan suatu analisis penyesuaian polinomial terbaik (*polynomial best fit*) untuk mendapatkan kecepatan fase yang dicari pada tahap 2, dengan menentukan fungsi penyesuaian terbaik polinomial pada ruas tersebut.
- 4 Menilai kecepatan rata-rata dengan memasukan panjang gelombang λ_i , ke dalam fungsi penyesuaian polinomial terbaik yang telah dihitung.
- 5 Sebaran data dispersi kecepatan fase telah diperoleh. Hasil analisis ini menghasilkan satu set data kurva dispersi yang digunakan untuk proses inversi.

3. Analisis Kedua: Inversi Kurva Dispersi Eksperimen

Untuk tahapan inversi, dimulai dengan perumusan model *refined inversion* berbasis matriks kekakuan dinamik 2 D dan 3 D, selanjutnya apabila proses telah terwujud dilakukan simulasi. Dalam proses inversi ini suatu profil diasumsikan untuk membangun model kurva dispersi teori melalui perhitungan balik (*backcalculation*). Setelah kurva dispersi teori dibangun

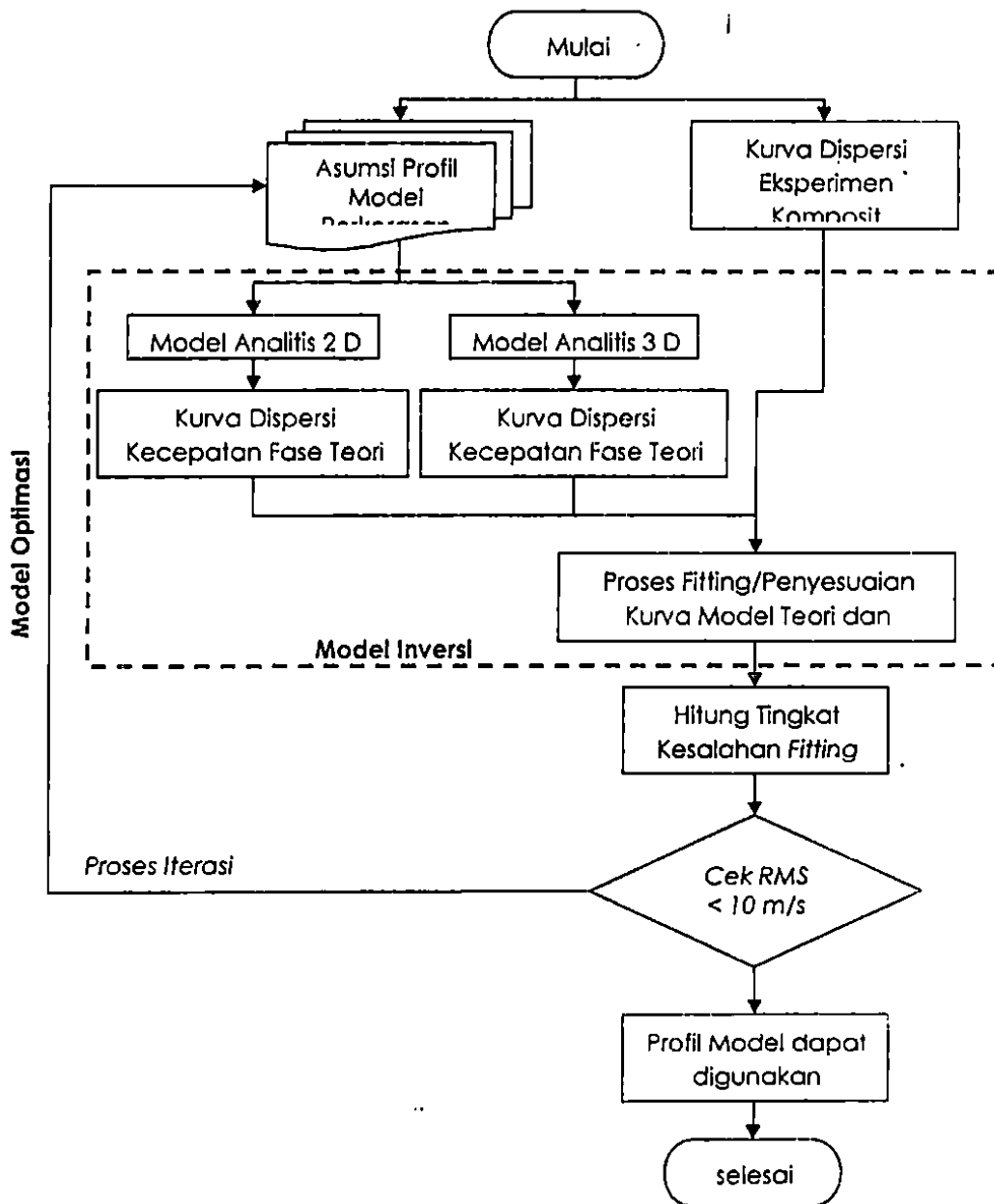
penyesuaian terbaik (*best-fitting*) untuk mendapatkan profil akhir. Dalam proses iterasi penyesuaian digunakan model optimasi dimana dalam penelitian ini menggunakan model kemiripan maksimum (Joh, 1996; Rosyidi, 2004).

a. Kurva Dispersi Teori 2 D dan 3 D Matriks Kekakuan Dinamik

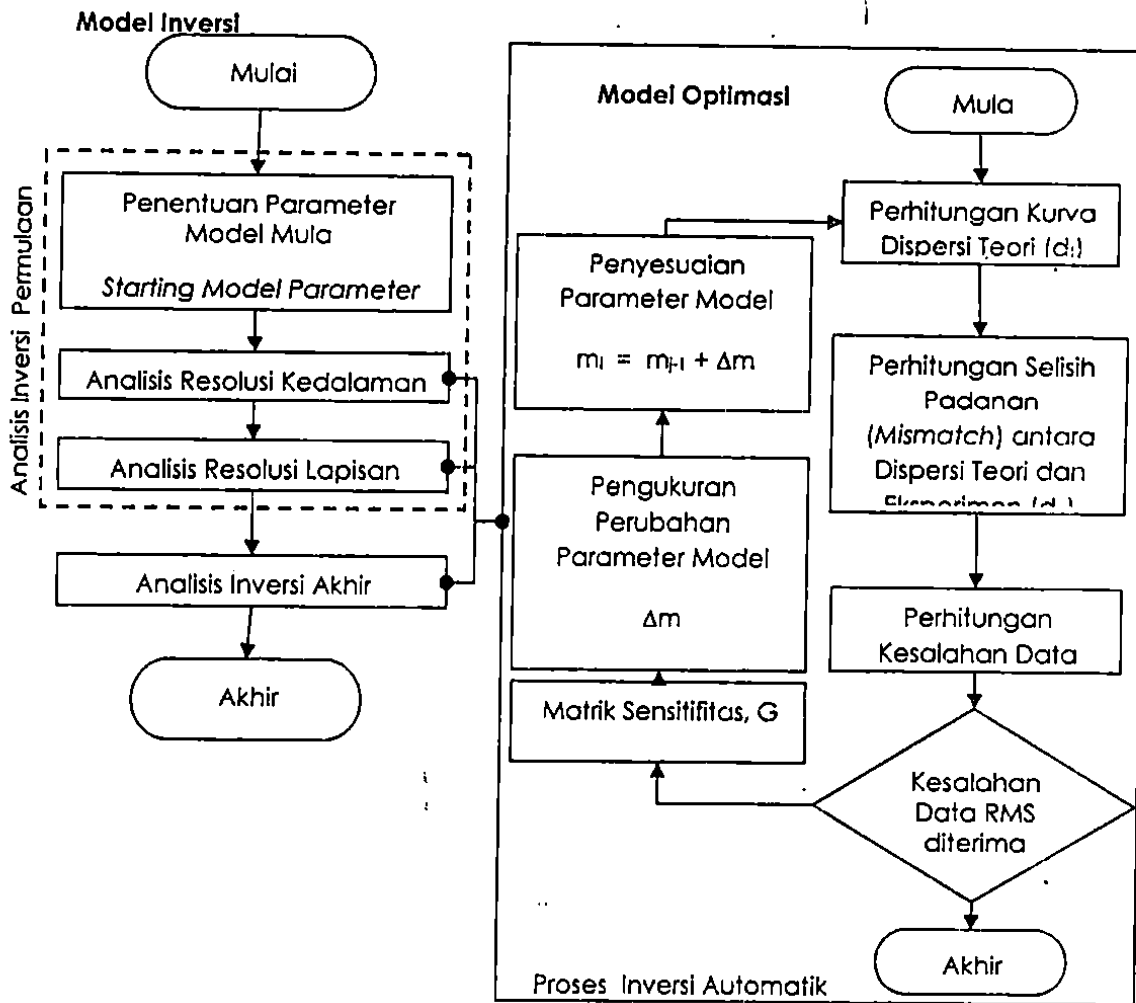
Untuk membangun kurva dispersi teori dalam proses inversi digunakan algoritma model perambatan gelombang 2 D dan 3 D dari tahapan analisis pertama sebagaimana dijelaskan bagian perambatan gelombang R di atas atau dalam Gambar 4.3. Melalui persamaan diskrit 2 D dan 3 D yang telah dihasilkan dari analisis dapat diperoleh kurva fungsi nyata dan imajiner dalam domain spasial. Selanjutnya berbasis kedua kurva dapat dianalisis spektrum fase guna menghasilkan suatu kurva dispersi teori. Aplikasi model 2 D dan 3 D dalam alur global dijelaskan dalam Gambar 4.10. Masing-masing model 2 D dan 3 D tersebut dalam proses inversi disusun dalam beberapa tahapan detail analisis (Gambar 4.11). Penjelasan mekanisme aplikasi model 2 D dan 3 D untuk proses inversi dalam penelitian ini diuraikan sebagai berikut ini.

1. Parameter Model Permulaan (*Starting Model Parameter, SMP*)

Parameter model permulaan (SMP) digunakan untuk mempermudah proses inversi yang dilakukan. Tahapan ini merupakan tahapan pertama yang harus dijalankan untuk menyediakan informasi awal bagi analisis inversi. Beberapa variabel dalam SMP yang sangat berpengaruh dalam pembangunan kurva dispersi teori yaitu pada parameter kecepatan fase (V_{PH}) dan ketebalan lapisan (H) sedangkan parameter rasio Poisson bahan, berat volume bahan, faktor pelemahan (D) dapat diasumsikan sesuai kondisi bahan perkerasan. Proses pertama yang perlu dilakukan untuk membangun parameter model permulaan adalah penentuan profil kecepatan fase sebagai fungsi frekuensi.



Gambar 4.10. Alir Kerja Model Inversi Kurva Dispersi Kecepatan Fase



Gambar 4.11. Skematik Tahap dan Metode yang Digunakan dalam Inversi dan Optimasi Kurva Dispersi Kecepatan Fase untuk Model 2 D dan 3 D

Prosedur untuk perhitungan profil ini dibagi dalam dua fase yaitu profil kecepatan fase pertama dan kedua. Penjelasan rinci kedua tahapan dijelaskan berikut. Profil fase pertama berisi informasi jumlah dan ketebalan lapisan yang ditentukan berdasarkan distribusi data kurva dispersi eksperimen. Cara perhitungannya secara umum mengikuti alir berikut :

- a. Pengukuran jumlah lapisan (N_p) profil fase pertama yang berreferensi kepada jumlah

- b. Pengukuran tebal lapisan (H_p) pada fase pertama dihitung berdasarkan panjang gelombang yang diberikan oleh kurva dispersi eksperimen dan perbandingan kedalaman terhadap panjang gelombang (α) sebagai :

$$H_{p,i} = \alpha (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (4.19)$$

α diberikan nilai antara 0.3 hingga 0.8.

- c. Penentuan kecepatan geser setiap lapisan dihitung satu per satu yang dimulai daripada lapisan paling atas. Nilai kecepatan geser dihitung berdasarkan kecepatan fase eksperimen dan sifat lapisannya. Lapisan pertama diasumsikan sebagai sistem satu lapisan yang merupakan data panjang gelombang terpendek dalam kurva dispersi eksperimen. Proses seterusnya dimulakan dengan penyusunan matrik kekakuan satu lapisan berdasarkan kecepatan gelombang geser (V_{SP1}) yang diasumsikan bernilai sama dengan nilai kecepatan fase eksperimen. Seterusnya kecepatan gesernya diubah-ubah (*varied*) sehingga mendapatkan penentu matrik kekakuan (*determinant of the stiffness matrix*) adalah konstan. Kecepatan geser akhir lapisan pertama yang digunakan dalam perhitungan ini adalah nilai kecepatan fase yang diperolehi daripada penentu matrik kekakuan yang bernilai konstan. Perhitungan kecepatan gelombang geser untuk lapisan berikutnya adalah sama seperti yang telah dijalankan pada lapisan pertama. Hanya perhitungan kecepatan geser pada lapisan kedua dimodelkan sebagai sistem dua lapisan.

Profil fase kedua adalah sebuah profil yang dibangun secara langsung daripada analisis inversi dan diasumsikan secara terpisah dari profil pertama. Profil fase yang pertama tidak sesuai digunakan untuk proses inversi karena terdapat banyak lapisan. Dengan demikian, profil fase kedua merujuk pada informasi lapangan kondisi perkerasan jalan yang sebenarnya (kondisi jaringan jalan di Indonesia). Kecepatan geser gelombang profil fase kedua dimodelkan dari maklumat profil fase pertama menggunakan metode rata-rata pemberat (*weighting average*). Metode rata-rata didasarkan pada kelambatan (*slowness*) yang *reciprocal* dengan kecepatan. Jumlah waktu perjalanan (T) dari kecepatan gelombang geser yang melalui dua lapisan

Rata-rata kecepatan gelombang geser yang melalui dua lapisan tersebut dapat ditentukan sebagai:

$$V_{S,\text{purata}} = \frac{H_1 + H_2}{\frac{H_1}{V_{S,1}} + \frac{H_2}{V_{S,2}}} \quad (4.21)$$

Seterusnya analisis model ke depan (*forward analysis*) dilakukan dan dihitung bagi menghasilkan kecepatan fase teori kurva dispersi dari profil permulaan yang diasumsikan. Persamaan ke depan tidak linier (*non linear forward equation*) yang digunakan untuk menghitung parameter model memerlukan beberapa proses iterasi. Untuk mengukur keberhasilan dan kesesuaian parameter model yang dianggarkan bagi profil perkerasan yang sebenarnya diperlukan metode untuk menilai ralat (e) yang merupakan nilai perbezaan di antara model dan data eksperimen.

Dalam penelitian ini digunakan pengukur kesalahan RMS (*root-mean-square*). Profil akhir dipilih setelah dihitung dengan variasi nilai perbandingan kedalaman dengan panjang gelombang (α). Profil permulaan yang digunakan dalam analisis dipilih dengan nilai α yang menghasilkan kesalahan RMS terkecil.

Penentu kesalahan RMS dihitung melalui persamaan:

$$\text{Kesalahan RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|^2} \quad (4.22)$$

Pertimbangan penggunaan RMS dalam penelitian ini adalah hasil perhitungan RMS tidak dipengaruhi oleh jumlah data yang tersedia (Rosyidi, 2004). Tambahan lagi, RMS mampu mewakili rata-rata kesalahan pada proses penyesuaian antara kurva dispersi teori dengan eksperimen secara tepat.

2. Perhitungan Matrik Sensitifitas (G) dan Analisis Matrik Kovarian (C)

Perhitungan matrik sensitifitas (G) dan matrik kovarian (C) digunakan untuk menghitung perubahan parameter model (Δm) asumsi dari SMP supaya diperolehi profil hasil inversi yang memiliki RMS yang paling kecil. Parameter model (m_{j-1}) kalibrasi dari profil inferensi awal dihitung menggunakan metode minimisasi maksimum

1) Matrik Sensitivitas

Matrik ini dibangun dari differensiasi fungsi korelasi fisik (*physical correlation*) yang dinilai berdasarkan setiap data yang berhubungan dengan parameter modelnya. Pembangunan matrik sensitifitas dalam analisis inversi berkaitan dengan penyusunan sensitifitas persamaan ke depan (*forward equation*) dalam menentukan nilai parameter-parameter model permulaan. Penurunan persamaan matrik dalam analisis ke depan dijelaskan secara terperinci dalam Menke (1989) dan Joh (1996). Secara ringkasnya, dalam penelitian ini, penurunan matrik parsial untuk analisis inversi global dapat ditulis sebagai:

$$G = \frac{\partial V_{ph}}{\partial V_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,j}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,m}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_{ph,i}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,i}}{\partial V_{s,j}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,i}}{\partial V_{s,m}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,j}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,m}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Sedangkan bentuk matrik turunan parsial untuk analisis inversi tersusun dijelaskan dalam persamaan di bawah ini:

$$G = \begin{pmatrix} \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{5cm} & \vdots \\ G_{p1} & \dots & G_{pm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data p dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 5 cm} \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{10cm} & \vdots \\ G_{q1} & \dots & G_{qm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data q dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 10 cm} \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{20cm} & \vdots \\ G_{r1} & \dots & G_{rm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data r dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 20 cm} \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

dengan, $G_{ij} = \frac{\partial V_{ph,j}^i}{\partial V_{s,j}}$ adalah turunan parsial (*partial derivative*) kecepatan fase ke j terhadap kecepatan gelombang geser lapisan ke i , dan $[G]_{5cm}$, $[G]_{10cm}$, $[G]_{20cm}$ merupakan matrik turunan data kurva dipersi rata-rata bagi jarak sensor 5, 10 dan 20 cm.

2) Matrik Kovarian

Nilai kovarian digunakan untuk mengukur derajat korelasi di antara dua variabel yang mana matrik kovarian data disusun dalam:

$$C_{D,y} = \begin{cases} \rho \sigma_{D,i} \sigma_{D,j} & (i \neq j) \\ \sigma_{D,i}^2 & (i = j) \end{cases} \quad (4.25)$$

disini, ρ merupakan konstanta korelasi yang mempunyai nilai $-1 \leq \rho \leq 1$ dan $\sigma_{D,i}$ adalah simpangan baku kecepatan fase pada suatu nilai panjang gelombang (atau frekuensi) untuk kecepatan fase (d_i) yang dihitung. Matrik ini diasumsikan sebagai matrik diagonal yang merupakan kuadrat simpangan baku kecepatan fase. Pertimbangan penggunaan susunan matrik ini karena korelasi di antara parameter-parameter hitung di sel matriknya tidak dapat diukur disebabkan data yang terlalu banyak. Matrik kovarian untuk parameter model dapat didefinisikan seperti dengan matrik kovarian data. Matrik kovarian parameter model m_i dan m_j , dinyatakan sebagai:

$$C_{M,y} = \begin{cases} \rho \sigma_{M,i} \sigma_{M,j} & (i \neq j) \\ \sigma_{M,i}^2 & (i = j) \end{cases} \quad (4.26)$$

Penentuan simpangan baku pada matrik data ini dapat dilakukan menggunakan nilai perbandingan ketidakpastian (*uncertainty ratio*), yang dinyatakan sebagai $\frac{\sigma_M}{\sigma_D}$, yang menunjukkan nilai ketidakpastian relatif parameter model terhadap data eksperimen. Dalam penelitian ini, nilai perbandingan ketidakpastian yang digunakan untuk menguji ketepatan model kemiripan maksimum (*maximum likelihood*) mempunyai nilai 1, 10, 100 dan $\frac{0.1V_s}{0.01V_{ph}}$. Dalam proses iterasi seterusnya, penyesuaian model ($m_j = m_{j-1} + \Delta m$) dijalankan untuk mendapatkan parameter model yang berhamburan/hambur sama dengan profil sebenarnya. Bersempitan umum

matrik kepekaan dan kovarian yang digunakan dalam penelitian ini dituliskan sebagai hubungan :

$$m_{n+1} = m_n - (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} (G^T C_D^{-1} \Delta d + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (4.27)$$

$$\Delta m = (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} (G^T C_D^{-1} \Delta d + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (4.28)$$

disini, Δm merupakan penyesuaian parameter model dan Δd adalah kesalahan padanan (*mismatched*) dari data kurva dsipersi eksperimen dan teori.

b. Pembangunan Analisis Resolusi (Resolution Analysis)

Analisis resolusi yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis solusi kedalaman dan analisis sensitifitas lapisan. Konsep dasar penurunan persamaan yang digunakan dalam model ini merujuk pada Menke (1989), Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Analisis resolusi kedalaman merupakan suatu prosedur untuk mengukur kedalaman yang teresolusi secara maksimum pada suatu profil perkerasan jalan berdasarkan data kurva dispersi eksperimen. Resolusi kedalaman berkaitan dengan kemampuan penetrasi gelombang R pada media. Kedalaman penetrasi ditentukan oleh frekuensi yang dibangkitkan dari suatu sumber gelombang di permukaan media dan nilai kekakuan bahan. Selanjutnya analisis sensitifitas lapisan dalam penelitian ini digunakan untuk fungsi sebagai pengukur kesesuaian lapisan yang diasumsikan dalam profil permulaan (SMP). Analisis ini dijalankan setelah analisis resolusi kedalaman dilakukan terhadap suatu profil permulaan dalam analisis inversi. Matrik resolusi parameter model di dalam analisis ini digunakan untuk menilai sejauh mana sensitifitas lapisan terhadap data yang diperoleh. Kriteria analisis sensitifitas lapisan yang digunakan adalah merujuk kepada nilai sensitifitas lapisan setengah ruang dimana lapisan-lapisan pada profil dapat diterima jika nilai sensitifitasnya lebih besar daripada lapisan setengah ruangnya. Apabila terdapat lapisan yang memiliki nilai matrik kepekaan di bawah kriteria ini (0.01), maka dilakukan analisis inversi awal dengan meningkatkan nilai kedalaman lapisan.

c. Instrumen Pemodelan

Dalam penelitian ini, perangkat lunak komputasi digunakan sebagai instrumen pemodelan, diantaranya:

1. Software Matlab versi 6.0.0 untuk melakukan simulai dan analisis numeris dari model 2 D dan 3 D matrik kekakuan dinamik. Kodina numerik yang digunakan telah

2. Software SASWPro digunakan untuk pembangunan kurva dispersi.
3. Software WinSASW versi 2.0.0 untuk pembangunan proses inverse dan optimasi.

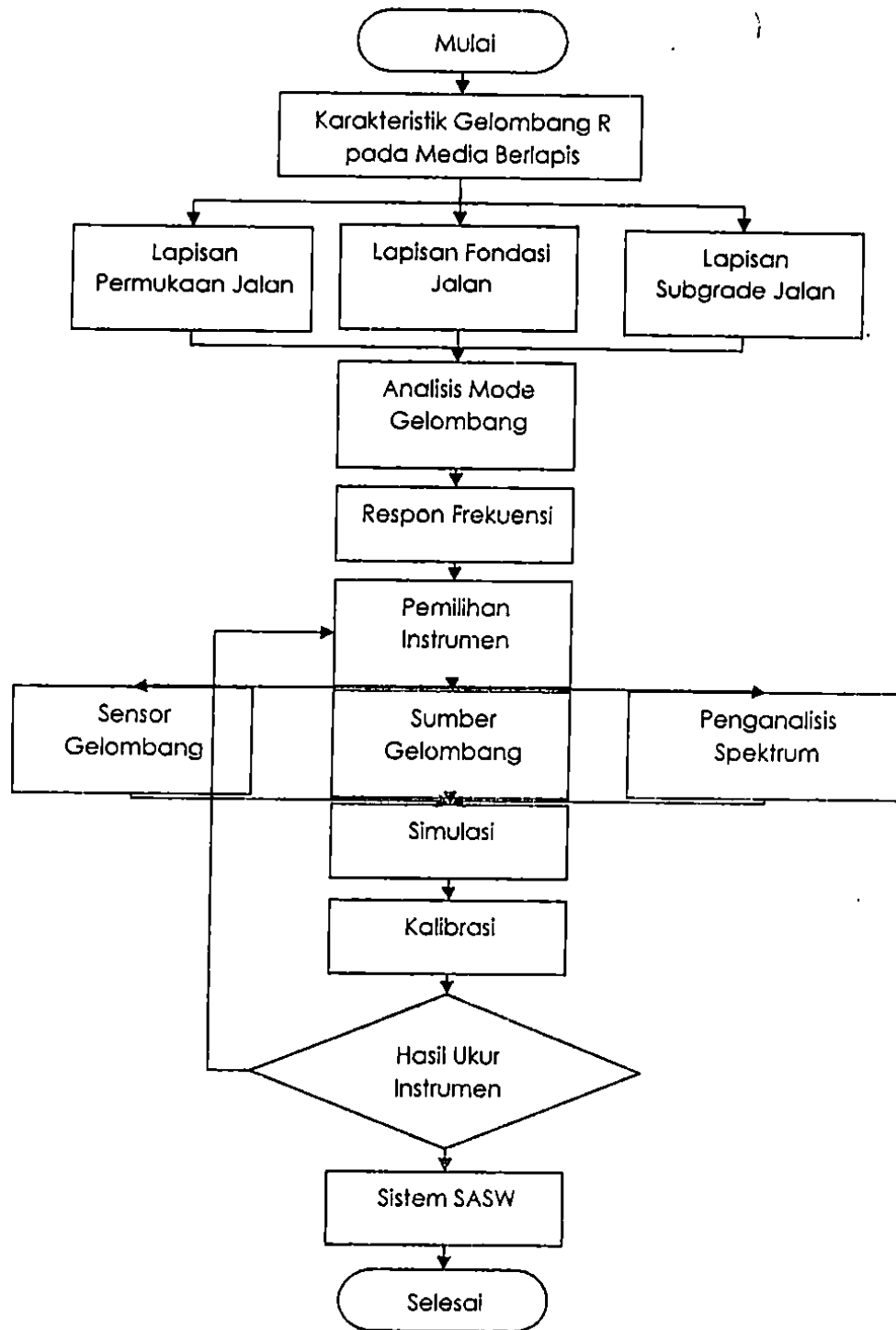
4. Analisis Ketiga: Pemilihan Instrumen dan Penyusunan Sistem SASW

Dalam penelitian ini, pemilihan instrumen yang digunakan dalam sistem SASW adalah penting untuk dapat mengukur sifat dan karakteristik perambatan gelombang R pada media perkerasan jalan secara tepat, akurat dan meminimalisasi deviasi kesalahan hasil akibat pengukuran lapangan. Parameter yang ditinjau adalah nilai frekuensi dan mode gelombang R. Parameter tersebut adalah efektif untuk digunakan sebagai indikator pemilihan dan pengukur instrumen SASW diantaranya sensor gelombang (*transducer*), penganalisis spektrum dan sumber gelombang yang digunakan. Selanjutnya instrumen terpilih perlu dikalibrasi melalui proses simulasi parameter frekuensi dan mode gelombang terhadap output data yang dikeluarkan oleh instrumen. Proses kajian ini diakhiri dengan penyusunan sistem SASW yang digunakan untuk penilaian nilai dinamik perkerasan jalan. Uraian alur mekanisme kegiatan ini dijelaskan secara skematik pada Gambar 4.12. Adapun penjelasan detail instrumen dalam sistem SASW diberikan di bawah ini.

• Sensor Gelombang

Dalam penelitian ini digunakan sensor jenis akselerometer piezoelektrik (*piezoelectrical accelerometer*) untuk merekam perambatan gelombang seismik di atas model perkerasan jalan. Akselerometer yang digunakan bagi penelitian ini adalah piezoelektrik simetri tunggal DJB model A/123/E dengan rentang reaksi frekuensi $\pm 5\%$ pada 1.2 hingga 20 kHz (Gambar 4.13). Gambar 4.13 juga menunjukkan detail informasi mengenai bagian dan komponen penting dalam sensor piezoelektrik. Sensor ini bekerja dengan mengalirkan energi elektrik ke unit akuisisi dari simpangan gelombang seismik yang diterima oleh pelat landasan di atas permukaan jalan. Pemilihan sensor ini didasarkan kemampuannya untuk mendeteksi dan merekam getaran dari rentang frekuensi rendah (untuk lapisan tanah dasar dan lapisan fondasi) kepada frekuensi tinggi (lapisan permukaan). Wilayah frekuensi didapatkan dari simulasi respon frekuensi yang diperlukan (Persamaan 4.4) dan uji kalibrasi lapangan sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 4.1 berikut ini. Dari Tabel 4.1, hasil uji kalibrasi lapangan respon frekuensi dari beberapa macam sumber gelombang yang digunakan terhadap sensitifitas sensor akselerometer diberikan. Akselerometer DJB model A/123/E terbukti

memiliki rentang frekuensi respons yang lebar dari rentang frekuensi rendah ke tinggi

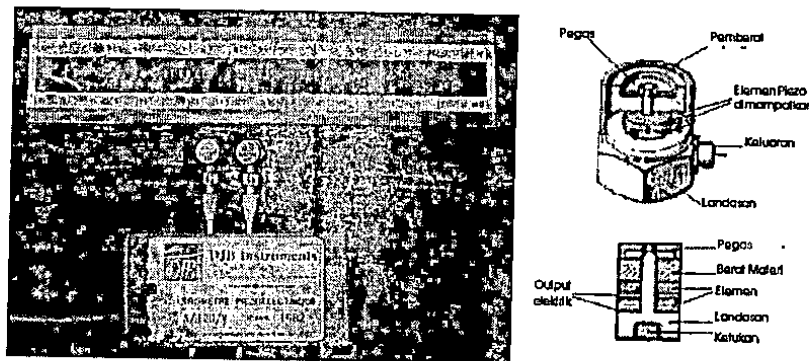


Gambar 4.12. Skematik Alur Pemilihan dan Kalibrasi Instrumen untuk Sistem SASW

Untuk memastikan bahwa frekuensi sinyal gelombang permukaan yang diterima sensor adalah sama dengan frekuensi sumber selanjutnya...

dikalibrasi memakai kalibrator sinyal. Kalibrator yang digunakan dalam penelitian ini adalah SN 412 Piezotronics 394-2060-80 Model no.394B06 dengan frekuensi (deviasi 1%) = 79.6 Hz, Akselerasi unit g (ms^{-2}) rms = 1.00 (9.81).

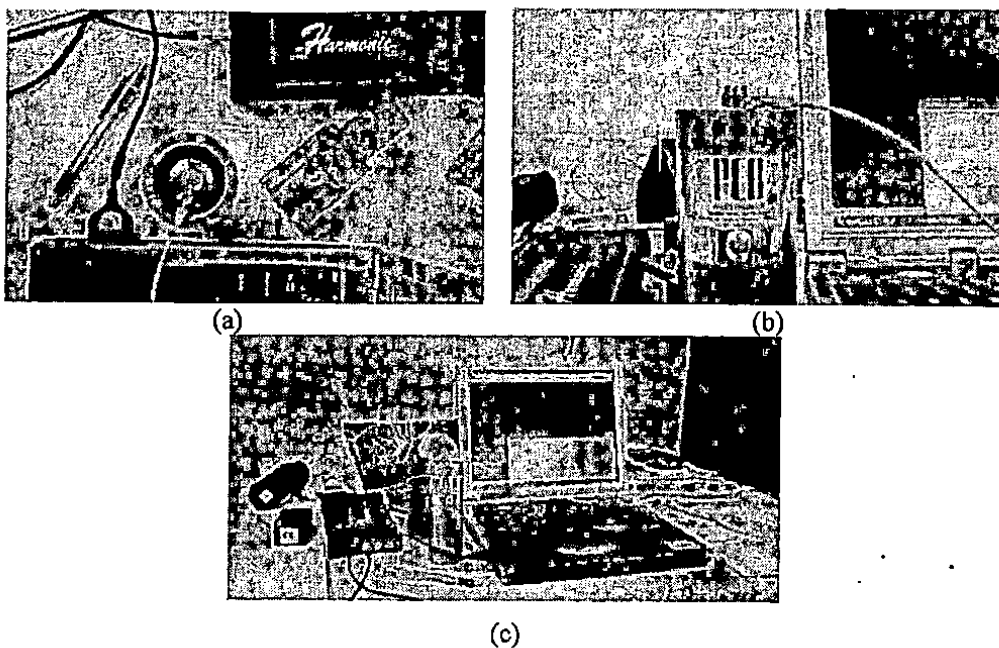
Kalibrator memiliki ukuran fisik 51 mm diameter dan 134 mm panjang, dengan berat 600 g, yang merupakan produksi dari PCB Piezotronics, Walden Ave, New York. Gambar 4.14 menunjukkan proses kalibrasi yang dilakukan dan kalibrator yang digunakan. Kalibrator memberikan sinyal terukur dengan frekuensi dan magnitude tertentu pada 79.6 Hz dan 120 dB dengan $\pm 1\%$ RMS 9.81 g – angka akselerasi: $1.000 + 0.1 m/s^{-2}$. Sensor yang diletakkan di atas kalibrator, akan memberikan respon terhadap sinyal yang diterima. Selanjutnya apabila frekuensi dari kalibrator dan sensor tidak sepadan, maka ukuran sensitifitas sensor disesuaikan (adjust) sehingga antara frekuensi kalibrator dan sensor adalah sama. Tabel 4.2 menunjukkan ukuran sensitifitas yang terkalibrasi dan identitas sensor yang digunakan dalam penelitian ini. Proses kalibrasi dilakukan di Laboratory of Engineering Acoustics, Department of Mechanical and Material Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia.



Gambar 4.13. Sensor akselerometer yang digunakan dalam penelitian; tampak dari atas (ukuran diameter 6 mm) dan sketsa detil sensor piezoelektrik

Tabel 4.1. Wilayah frekuensi untuk beberapa sumber gelombang yang digunakan

Berat Bola Baja (g)	Wilayah Frekuensi (kHz)		Berat Palu (kg)	Wilayah Frekuensi (kHz)	
	Terendah	Tertinggi		Terendah	Highest
5	9.8	20	0.19	962.5	2575
15	8	18	0.58	556.25	1718.75
30	4	12	1.1	487.5	1575
45	2	8	1.92	406.25	1087.5
65	1	3	4.87	194	580
130	0.813	2.26			
225	0.775	2.17			
360	0.663	1.72			



Gambar 4.14 Proses kalibrasi sensor; kalibrator dan sensor tampak dari atas (a), tampak dari samping (b), dan set up proses kalibrasi keseluruhan (c)

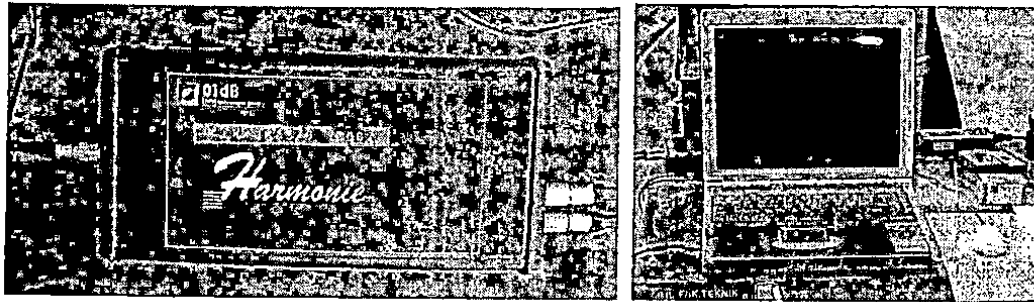
Tabel 4.2. Hasil kalibrasi sensitivitas sensor (27 Juli 2007)

Jenis Sensor	Informasi Sensor		Sensitivitas	
	Kode	Unit Pengukuran	Sebelum Kalibrasi	Setelah Kalibrasi
Akselerometer	DJB 836	$V/m/s^{-2}$	$8.838e^{-04}$	$8.831e^{-06}$
	DJB 837	$V/m/s^{-2}$	$7.938e^{-04}$	$9.966e^{-06}$
	DJB 1982	$V/m/s^{-2}$	---	$4.899e^{-06}$

• Penganalisis Spektrum

Penganalisis spektrum merupakan peralatan osiloskop dan perekam data gelombang dalam bentuk digital. Peralatan penganalisis spektrum terdiri dari satu unit akuisisi (*acquisition unit*) yang dihubungkan kepada komputer "notebook" melalui kartu PC. Simpangan gerak partikel gelombang R yang diterima sensor adalah data analog akselerasi yang diubah ke dalam bentuk digital melalui unit akuisisi dan seterusnya dijalankan operasi spektrum oleh komputer. Dalam penelitian ini digunakan satu unit akuisisi *Harmonie* 01dB berspesifikasi IEC 651-804 tipe 1 (Gambar 4.15). Unit *Harmonie* berukuran 110 x 35 x 220 mm dengan berat 700 grams yang dipasangkan dengan empat saluran input analog dari sensor dan satu saluran output untuk kartu PC standar (PCMCIA) pada komputer. Wilayah dinamik maksimum yang dapat diterima oleh penganalisis spektrum adalah 120 dB yang bergantung kepada kenekanan sensor. Sebuah software *Harmonie dBEA 32* dengan sistem operasi

fast Fourier transform (FFT) dipasangkan dalam komputer untuk operasi spektrum data digital yang berkemampuan menjalankan analisis frekuensi sampel hingga 51.4 kHz dan spektrum frekuensi hingga 3200 garis.



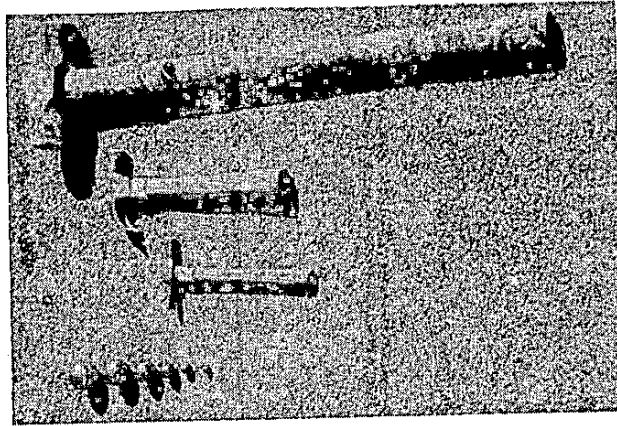
(a)

(b)

Gambar 4.15 Penganalisis spektrum: unit akuisisi (a) dan sebuah komputer notebook untuk operasi spektrum

- **Sumber Mekanik Gelombang**

Sumber mekanik gelombang yang digunakan untuk pengujian SASW adalah sumber yang mampu menghasilkan tenaga gelombang permukaan Rayleigh pada rentang frekuensi yang diperlukan dalam pengukuran. Dalam penelitian ini digunakan jenis sumber sementara (*transient source*), yang serupa dengan sumber pukulan mekanik seperti bola baja, palu ringan dan palu besar. Kebaikan penggunaan berbagai jenis sumber gelombang ini adalah kemudahan dalam mobilitas dan pengukuran di lapangan (Rosyidi, 2004). Tambahan lagi, sumber ini dapat untuk menghasilkan pengukuran domain waktu bagi peningkatan kualitas sinyal terhadap gangguan (*signal to noise ratio*). Berdasarkan pengujian dan simulasi respon frekuensi sebagaimana diberikan dalam Tabel 4.1, sumber gelombang berupa bola baja (steel ball bearing) dengan variasi berat 5 hingga 15 g digunakan untuk mengukur pergerakan gelombang dengan frekuensi tinggi. Frekuensi gelombang tinggi diperlukan untuk pengambilan sampel gelombang yang merambat pada lapisan permukaan model perkerasan jalan pada jarak sensor pendek. Palu ringan dan berat dengan ukuran 1.1 dan 4.87 kg digunakan untuk mendapatkan data gelombang pada lapisan fondasi dan tanah dasar model perkerasan jalan dengan jarak antar sensor menengah dan panjang. Gambar 4.16 menunjukkan beberapa variasi sumber gelombang yang digunakan dalam penelitian ini



Gambar 4.16 Sumber gelombang mekanik: satu set bola baja dan palu ringan hingga berat

- **Penyusunan Sistem SASW terintegrasi**

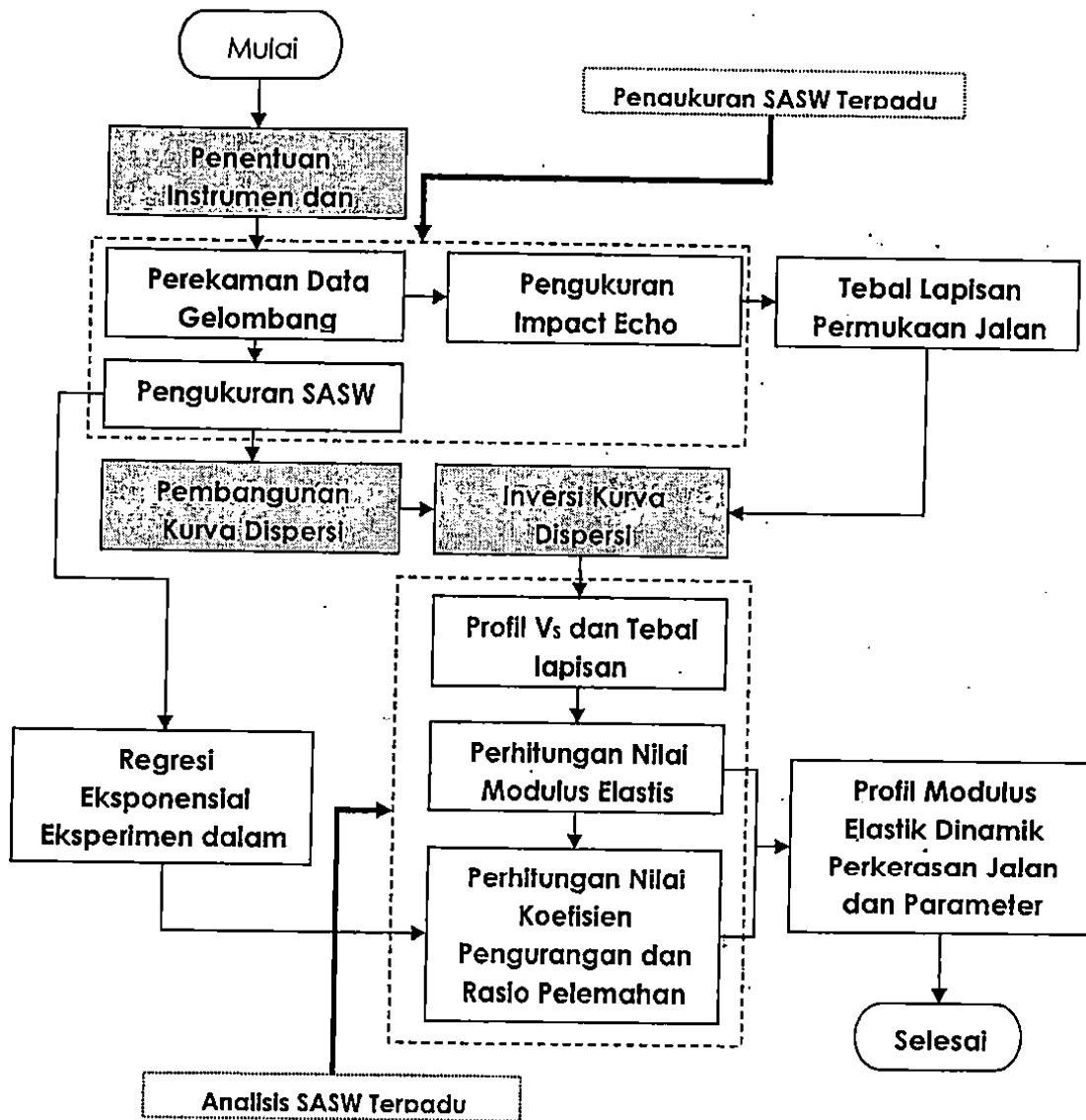
Sistem SASW terpadu yang diterapkan dalam penelitian ini terdiri dari tiga fase utama; yaitu pengumpulan data, penyusunan kurva dispersi dan inversi kurva dispersi untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser (V_s) bahan jalan. Gambar 4.17 menunjukkan bagan alir sistem SASW yang digunakan dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini, parameter hasil pengujian SASW tidak hanya dinyatakan dalam nilai modulus elastik saja, namun secara terpadu sistem SASW termodifikasi ini disusun suatu penyelesaian analisis untuk mendapatkan parameter rasio pelemahan dan koefisien pengurangan bahan (Gambar 4.17).

Penjelasan mengenai penyusunan kurva dispersi dan proses inversi kurva dispersi telah dikemukakan dalam pembahasan metode analisis pada sub-bab di atas. Pada bagian penyusunan sistem SASW terintegrasi ini dijelaskan prosedur umum cara pengumpulan data, analisis data pasca-inversi dan metode pengambilan data SASW terintegrasi dengan impact echo.

a). **Prosedur Pengumpulan Data SASW**

Proses pengumpulan data gelombang dalam pengujian SASW secara berurutan dijelaskan sebagai berikut :

1. Sebelum pengambilan data di lapangan, dilakukan penentuan satu set jarak sensor (d) yang diperlukan yang terdiri dari ukuran jarak antara sensor dan pengukuran jarak dari letak sumber gelombang kepada sensor terdekat.



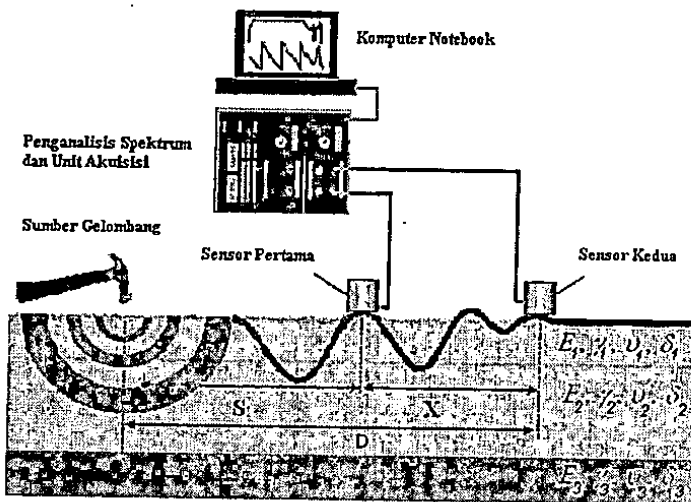
Proses ini telah dijelaskan di bagian

Penentuan jarak didasarkan dari hasil penelitian oleh Heisey et al. (1982), Sanchez-Salinerro et al. (1987), Sheu at al. (1988) dan Roesset et al. (1989) yang merekomendasikan suatu acuan penentuan jarak antar sensor terpendek mengikut:

$$S = X \quad (4.29)$$

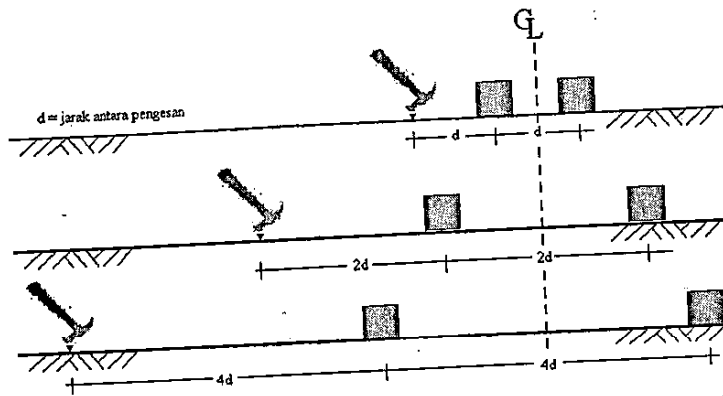
$$\frac{\lambda_{\max}}{3} \leq X \leq 2\lambda_{\min} \quad (4.30)$$

dengan, S merupakan jarak antara sumber gelombang dengan sensor terdekat, sedangkan X merupakan jarak antar sensor (Gambar 4.18). Batas atas pada panjang gelombang digunakan untuk menghindari kesalahan yang disebabkan oleh penganalisis frekuensi pada nilai terendah dari sudut fase yang terukur. Batas bawah memberikan batasan bahwa jarak panjang gelombang sangat pendek menjadikan gelombang akan berkurang secara cepat.



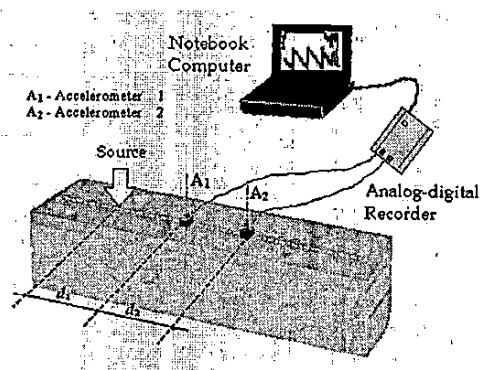
Gambar 4.18 Set up pengukuran SASW

Jika jarak terpendek telah ditentukan, nilai jarak ini selanjutnya dilebarkan secara berganda, biasanya dimulai dengan jarak yang terpendek. Perubahan jarak sensor ini bertujuan untuk memperoleh seluruh wilayah panjang gelombang yang dirancang.



Gambar 4.19 Penentuan letak sensor dan sumber gelombang dalam pengukuran

2. Selanjutnya ditentukan suatu sumber gelombang dan sepasang sensor yang tepat untuk setiap wilayah frekuensi yang telah ditentukan. Nilai wilayah frekuensi yang dihasilkan oleh sesuatu sumber bergantung kepada bentuk dan berat sumber tersebut (Matthews et al., 1996). Perhitungan wilayah frekuensi ini telah dijelaskan dalam Persamaan 4.4 di atas. Oleh yang demikian, untuk menghasilkan pergerakan gelombang dalam wilayah frekuensi yang diperlukan dalam sesuatu pengukuran, beberapa set berat dan bentuk sumber gelombang perlu digunakan bagi memperolehi sinyal yang berkualitas baik.
3. Garis tengah imajiner dalam susunan sensor diukur dan ditentukan. Seterusnya dua sensor dengan spesifikasi yang sama, diletakkan dalam satu garis lurus di atas permukaan lapisan yang telah diukur mengikut konfigurasi titik tengah sensor (Gambar 4.20). Sensor juga harus terlekat secara baik di permukaan jalan agar dapat mendeteksi pergerakan gelombang dengan jelas dan tidak terdapat gangguan pada perpindahan fase akibat reaksi yang berbeda dari sensor. Lampiran dokumentasi pengujian diberikan dalam Lampiran I. Penganalisis spektrum selanjutnya diatur untuk menunjukkan operasi spektrum tenaga, fungsi transfer atau spektrum tenaga silang dan fungsi koheren.
4. Gelombang seismik dihasilkan dari sumber gelombang yang dijatuhkan atau dipukulkan dengan energi terbatas ke atas permukaan jalan guna menyalurkan energi seismik tersebut menuju ke kedua sensor. Penghasilan dan perekaman gelombang dilakukan secara berulang kali untuk memperoleh sinyal rata-rata dalam domain frekuensi. Rata-rata sinyal yang diperoleh melalui pengulangan pengukuran dapat menghilangkan pengaruh gangguan acak (*random noise*) dan sinyal yang tidak jelas pada proses perekaman data (Nazarian, 1984; Karl, 1989).

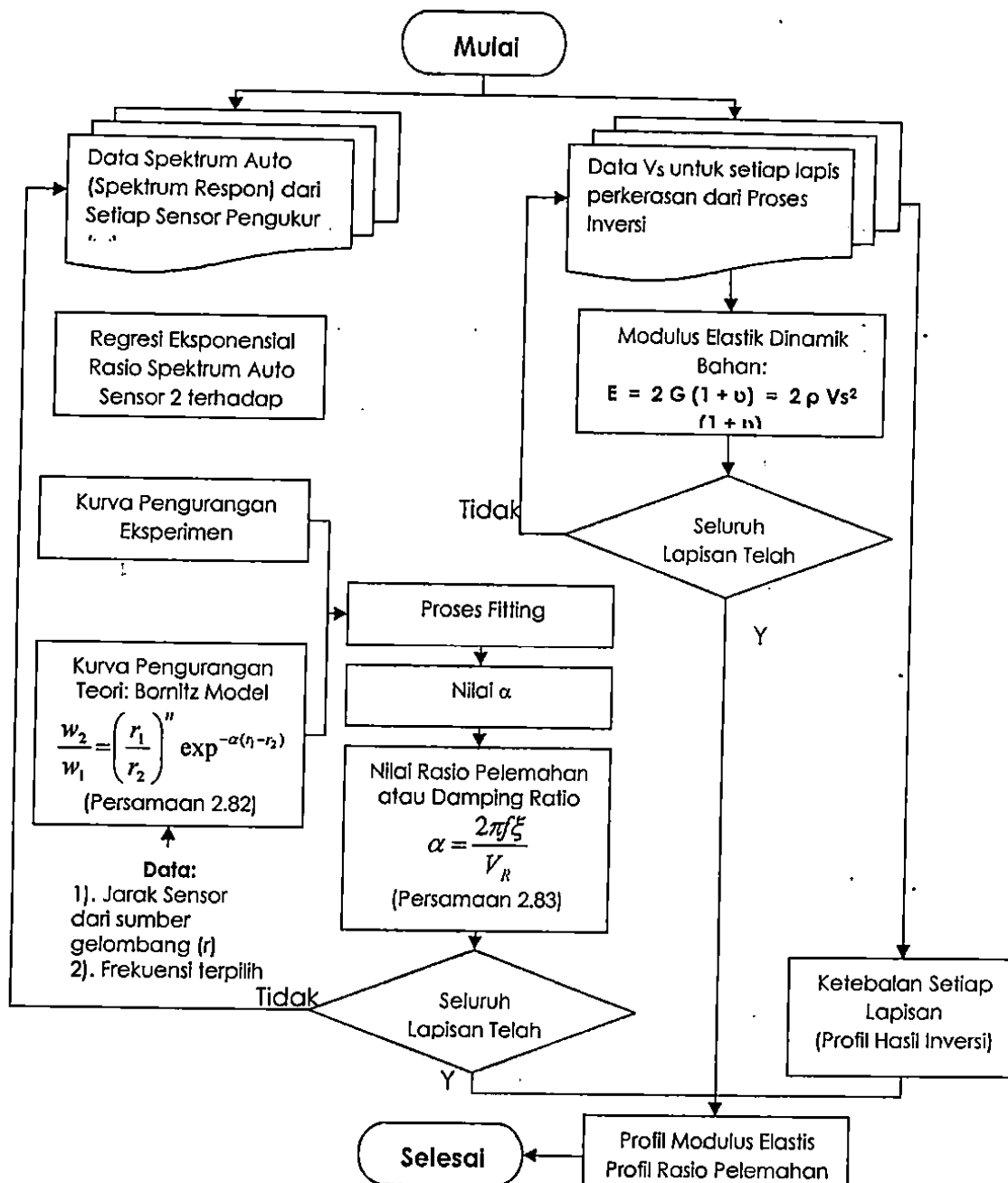


Gambar 4.20 Skematik susunan sensor dan sumber gelombang mengikuti konfigurasi titik tengah sensor (CMP)

5. Selanjutnya, parameter suhu perlu diukur di permukaan dan di dalam lapisan permukaan jalan yang diuji setiap selesai pengukuran gelombang dan perekaman data oleh penganalisis spektrum. Kontrol parameter ini dapat menjelaskan pengaruh viskositas aspal dalam penentuan modulus elastik bahan lapisan perkerasan menggunakan aspal atau bitumen.
6. Kecepatan fase dapat dihitung secara cepat menggunakan beberapa nilai frekuensi daripada spektrum fase yang diukur oleh penganalisis spektrum di lapangan. Cara ini dilakukan untuk membandingkan kecepatan fase dari hasil penganalisis spektrum dengan nilai asumsi kecepatan fase awal. Tahapan ini dijalankan bagi mengontrol hasil spektrum fase dan nilai kecepatan supaya sesuai dengan media yang diukur. Untuk mendapatkan hasil resolusi yang baik bagi kurva penyebaran lapangan, hasil spektrum fase tertutup (*unwrapping*) sebaiknya mempunyai dua hingga empat siklus (Joh, 1996).
7. Kedudukan sensor selanjutnya diubah dan disesuaikan untuk jarak pengesan dan sensor yang telah ditetapkan pada tahap pertama. Kemudian tahap dua hingga enam di atas diulangi sehingga pengujian dilakukan bagi semua jarak pengesan. Dalam penerapan SASW di perkerasan jalan, penggunaan konfigurasi pengukuran profil depan (*forward profile measurement*) saja dapat dijalankan bagi keseluruhan jarak sensor. Hal ini karena profil perkerasan memiliki tebal lapisan yang teratur dan seragam secara horisontal serta tidak memiliki lapisan miring (*dip slope*). Oleh itu pengukuran profil kebalikan (*reverse profile measurement*) dapat diabaikan.

b). Prosedur Analisis Modulus Elastik dan Rasio Pelemahan

Sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 4.21, setelah diperoleh nilai kecepatan gelombang dapat ditentukan nilai modulus elastik dan rasio pelemahan setiap bahan penyusun model perkerasan jalan. Gambar 4.21 menjelaskan prosedur analisis secara sistematis.



Gambar 4.21 Bagan alir analisis SASW terpadu untuk mendapatkan profil modulus elastis dan nilai rasio pelemahan

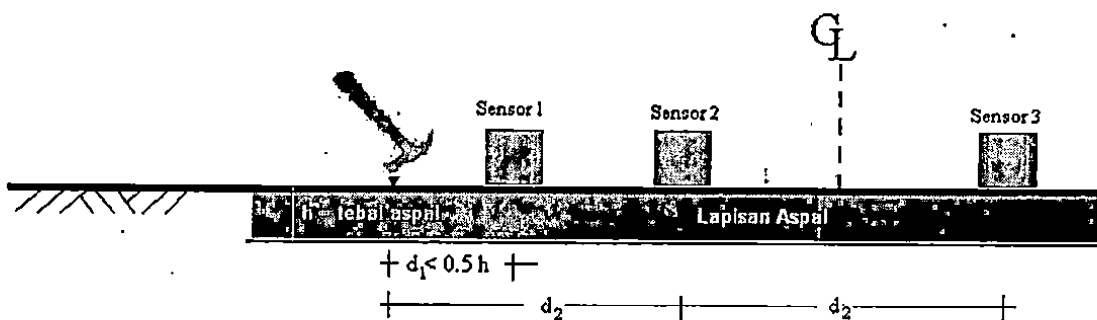
c). Prosedur Pengambilan Data SASW terpadu dengan Impact Echo

Pengambilan data untuk SASW telah dijelaskan dalam bagian prosedur pengumpulan data SASW dalam sub-bab ini. Perbedaan metode SASW ini dengan sistem terpadu impact echo adalah dengan menambahkan satu sensor lagi (menjadi tiga sensor), yang diletakkan sangat dekat dengan sumber gelombang dengan jarak, S sebesar:

$$S < 0.5 D \quad (4.31)$$

dengan D adalah tebal lapisan permukaan.

Gambar 4.22 menunjukkan konfigurasi pengukuran SASW terpadu, yaitu sensor pertama diletakkan pada jarak kurang dari 0.5 tebal lapisan permukaan perkerasan jalan, sedangkan sensor kedua dan ketiga disusun sesuai konfigurasi pengukuran SASW.

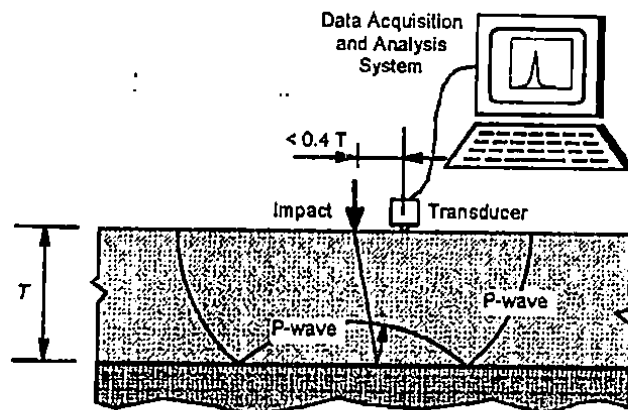


Gambar 4.22. Penentuan letak sensor dan sumber gelombang dalam pengukuran integrasi impact echo dan SASW

Data yang diminati dari perolehan pengukuran lapangan dari sensor pertama adalah data rekaman sinyal gelombang dalam domain waktu dan data frekuensi responnya, sedangkan untuk sensor kedua dan ketiga adalah data gelombang dalam domain frekuensi untuk pembangunan kurva dispersi.

Waktu kedatangan gelombang pantulan P dari data sinyal sensor pertama dapat diperoleh sebagai nilai waktu kedatangan gelombang pertama sebelum gelombang S dan R . Berdasarkan nilai waktu pantulan dari sumber gelombang ke sensor pertama dan kecepatan gelombang P , maka dapat diperoleh nilai tebal lapisan permukaan perkerasan jalan. Gambar

4.23 dan Persamaan 4.32 menunjukkan proses perhitungan tebal lapisan permukaan menggunakan nilai pantulan gelombang P.



Gambar 4.23 Skematik penentuan tebal perkerasan jalan menggunakan metode impact echo

Tebal perkerasan dapat ditentukan dengan:

$$T = \frac{0.96 C_p}{2f_T} \quad (4.32)$$

dengan C_p = kecepatan gelombang P; f_T = frekuensi respon untuk nilai amplitudo puncak dan 0.96 adalah koefisien efek plat dari anggapan lapisan perkerasan.

Akurasi data tebal ini diperlukan untuk pemrosesan inversi kurva dispersi eksperimen dalam analisis SASW yang lebih tepat dan cepat. Sebagai tambahan, proses ini juga dapat mengurangi pekerjaan pengeboran tebal lapisan permukaan perkerasan jalan untuk mendapatkan informasi tebal lapisan perkerasan jalan.

B. TAHAPAN KEDUA PENELITIAN

Dalam tahapan kedua ini, dijelaskan metode penyusunan model fisik perkerasan jalan yang digunakan dalam penelitian ini. Model fisik perkerasan jalan dipilih dengan jenis struktur perkerasan lentur karena struktur tersebut paling dominan digunakan di Indonesia. Pada bagian ini dijelaskan beberapa mekanisme penyusunan dan pengukuran model fisik yang telah dikerjakan, yaitu disain model, pengujian bahan model dan penentuan parameter ukur SASW pada model. Penjelasan lebih lanjut mengenai hal-hal tersebut akan dibahas pada bab selanjutnya.

1. Disain Model Perkerasan Jalan

1). Narasi AASHTO 1993 untuk Perencanaan Tebal Perkerasan Model

Salah satu metoda perencanaan untuk tebal perkerasan jalan yang sering digunakan adalah metoda AASHTO'93. Metoda ini sudah dipakai secara umum di seluruh dunia untuk perencanaan serta di adopsi sebagai standar perencanaan di berbagai negara. Metoda AASHTO'93 ini pada dasarnya adalah metoda perencanaan yang didasarkan pada metoda empiris. Parameter yang dibutuhkan pada perencanaan menggunakan metoda AASHTO'93 ini antara lain adalah :

- Structural Number (SN)
- Lalu lintas
- Reliability
- Faktor lingkungan
- Serviceability

▪ **Structural Number**

Structural Number (SN) merupakan fungsi dari ketebalan lapisan, koefisien relatif lapisan (layer coefficients), dan koefisien drainase (drainage coefficients). Persamaan untuk Structural Number sebagaimana dijelaskan pada Persamaan 2.86.

▪ **Lalu Lintas**

Prosedur perencanaan untuk parameter lalu lintas didasarkan pada kumulatif beban gandar standar ekuivalen (Cumulative Equivalent Standard Axle, CESA). Perhitungan untuk CESA ini didasarkan pada konversi lalu lintas yang lewat terhadap beban gandar standar 8.16 kN dan mempertimbangkan umur rencana, volume lalu lintas, faktor distribusi lajur, serta faktor bangkitan lalu lintas (growth factor).

▪ **Reliability**

Konsep reliability untuk perencanaan perkerasan didasarkan pada beberapa ketidakpastian (uncertainties) dalam proses perencanaan untuk meyakinkan alternatif-alternatif berbagai perencanaan. Tingkatan reliability ini yang digunakan tergantung pada

volume lalu lintas, klasifikasi jalan yang akan direncanakan maupun ekspektasi dari pengguna jalan.

Reliability didefinisikan sebagai kemungkinan bahwa tingkat pelayanan dapat tercapai pada tingkatan tertentu dari sisi pandangan para pengguna jalan sepanjang umur yang direncanakan. Hal ini memberikan implikasi bahwa repetisi beban yang direncanakan dapat tercapai hingga mencapai tingkatan pelayanan tertentu.

Pengaplikasian dari konsep reliability ini diberikan juga dalam parameter standar deviasi yang mempresentasikan kondisi-kondisi lokal dari ruas jalan yang direncanakan serta tipe perkerasan antara lain perkerasan lentur ataupun perkerasan kaku. Secara garis besar pengaplikasian dari konsep reliability adalah sebagai berikut:

Hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan klasifikasi dari ruas jalan yang akan direncanakan. Klasifikasi ini mencakup apakah jalan tersebut adalah jalan dalam kota (urban) atau jalan antar kota (rural).

Tentukan tingkat reliability yang dibutuhkan dengan menggunakan tabel yang ada pada metoda perencanaan AASHTO'93. Semakin tinggi tingkat reliability yang dipilih, maka akan semakin tebal lapisan perkerasan yang dibutuhkan.

Satu nilai standar deviasi (S_o) harus dipilih. Nilai ini mewakili dari kondisi-kondisi lokal yang ada. Berdasarkan data dari jalan percobaan AASHTO ditentukan nilai S_o sebesar 0.25 untuk rigid dan 0.35 untuk flexible pavement. Hal ini berhubungan dengan total standar deviasi sebesar 0.35 dan 0.45 untuk lalu lintas untuk jenis perkerasan rigid dan flexible.

▪ Faktor Lingkungan

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk perencanaan AASHTO didasarkan atas hasil pengujian dan pengamatan pada jalan percobaan selama lebih kurang 2 tahun. Pengaruh jangka panjang dari temperatur dan kelembaban pada penurunan serviceability belum dipertimbangkan. Satu hal yang menarik dari faktor lingkungan ini adalah pengaruh dari kondisi swell dan frost heave dipertimbangkan, maka penurunan serviceability diperhitungkan selama masa analisis yang kemudian berpengaruh pada umur rencana perkerasan.

Penurunan serviceability akibat roadbed swelling tergantung juga pada konstanta swell, probabilitas swell, dll. Metoda dan tata cara perhitungan penurunan serviceability ini dimuat pada Appendix G dari metoda AASHTO'93.

- **Serviceability**

Serviceability merupakan tingkat pelayanan yang diberikan oleh sistem perkerasan yang kemudian dirasakan oleh pengguna jalan. Untuk serviceability ini parameter utama yang dipertimbangkan adalah nilai Present Serviceability Index (PSI). Nilai serviceability ini merupakan nilai yang menjadi penentu tingkat pelayanan fungsional dari suatu sistem perkerasan jalan. Secara numerik serviceability ini merupakan fungsi dari beberapa parameter antara lain ketidakrataan, jumlah lobang, luas tambalan, dll.

Nilai serviceability ini diberikan dalam beberapa tingkatan antara lain :

1. Untuk perkerasan yang baru dibuka (open traffic) nilai serviceability ini diberikan sebesar 4.0 – 4.2. Nilai ini dalam terminologi perkerasan diberikan sebagai nilai initial serviceability (P_o).
2. Untuk perkerasan yang harus dilakukan perbaikan pelayanannya, nilai serviceability ini diberikan sebesar 2.0. Nilai ini dalam terminologi perkerasan diberikan sebagai nilai terminal serviceability (P_t).
3. Untuk perkerasan yang sudah rusak dan tidak bisa dilewati, maka nilai serviceability ini akan diberikan sebesar 1.5. Nilai ini diberikan dalam terminologi failure serviceability (P_f).

2). Persamaan AASHTO'93

Dari hasil percobaan jalan AASHO untuk berbagai macam variasi kondisi dan jenis perkerasan, maka disusunlah metoda perencanaan AASHO yang kemudian berubah menjadi AASHTO. Dasar perencanaan dari metoda AASHTO baik AASHTO'72, AASHTO'86, maupun metoda terbaru saat sekarang yaitu AASHTO'93 adalah persamaan seperti yang telah dijelaskan pada Persamaan (2.85) yang dituliskan kembali sebagai berikut :

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_o + 9.36 \log_{10} (SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{P_o - P_t}{P_o - P_f} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10} M_r - 8.07 \quad (2.85)$$

dimana:

W_{18} = Kumulatif beban gandar standar selama umur perencanaan (CESA).

Z_R = Standard Normal Deviate.

S_o = Combined standard error dari prediksi lalu lintas dan kinerja.

SN = Structural Number.

P_o = Initial serviceability.

P_t = Terminal serviceability.

P_f = Failure serviceability.

M_r = Modulus resilien (psi)

3). Langkah-Langkah Perencanaan Dengan Metoda AASHTO'93

Langkah-langkah perencanaan dengan metoda AASHTO'93 adalah sebagai berikut:

- Ditentukan lalu lintas rencana yang akan diakomodasi di dalam perencanaan tebal perkerasan. Lalu lintas rencana ini jumlahnya tergantung dari komposisi lalu lintas, volume lalu lintas yang lewat, beban aktual yang lewat, serta faktor bangkitan lalu lintas serta jumlah lajur yang direncanakan. Semua parameter tersebut akan dikonversikan menjadi kumulatif beban gandar standar ekuivalen (Cumulative Equivalent Standard Axle, CESA).
- Dihitung CBR dari tanah dasar yang mewakili untuk ruas jalan ini. CBR representatif dari suatu ruas jalan yang direncanakan ini tergantung dari klasifikasi jalan yang direncanakan. Pengambilan dari data CBR untuk perencanaan jalan biasanya diambil pada jarak 100 meter. Untuk satu ruas jalan yang panjang biasanya dibagi atas segmen-segmen yang mempunyai nilai CBR yang relatif sama. Dari nilai CBR representatif ini kemudian dapat diperoleh modulus resilien dari tanah dasar.

dimana :

CBR = nilai CBR representatif (%).

E = modulus elastisitas tanah dasar (psi).

- Kemudian ditentukan besaran-besaran fungsional dari sistem perkerasan jalan yang ada seperti Initial Present Serviceability Index (Po), Terminal Serviceability Index (Pt), dan Failure Serviceability Index (Pf). Masing-masing besaran ini nilainya tergantung dari klasifikasi jalan yang akan direncanakan antara lain urban road, country road, dll.
- Setelah itu ditentukan reliability dan standard normal deviate. Kedua besaran ini ditentukan berdasarkan beberapa asumsi antara lain tipe perkerasan dan juga klasifikasi jalan.
- Menggunakan data lalu lintas, modulus elastisitas tanah dasar serta besaran-besaran fungsional Po, Pt, dan Pf serta reliability dan standard normal deviate kemudian bisa dihitung Structural Number yang dibutuhkan untuk mengakomodasi lalu lintas rencana. Perhitungan ini bisa menggunakan grafik-grafik yang tersedia atau juga bisa menggunakan rumus AASHTO'93 seperti yang diberikan pada Persamaan 2.85.
- Langkah selanjutnya adalah menentukan bahan pembentuk lapisan perkerasan. Masing-masing tipe bahan perkerasan mempunyai koefisien layer yang berbeda. Penentuan koefisien layer ini didasarkan pada beberapa hubungan yang telah diberikan oleh AASHTO'93.
- Menggunakan koefisien layer yang ada kemudian dihitung tebal lapisan masing-masing dengan menggunakan hubungan yang diberikan pada Persamaan 1 diatas dengan mengambil koefisien drainase tertentu yang didasarkan pada tipe pengaliran yang ada.
- Kemudian didapat tebal masing-masing lapisan. Metoda AASHTO'93 memberikan rekomendasi untuk memeriksa kemampuan masing-masing lapisan untuk menahan

2). Perhitungan Sistem Perkerasan Ideal

Untuk model perkerasan yang dibuat didasarkan pada asumsi lalu lintas rendah yang diindikasikan oleh beban standar gandar kumulatif (CESA) yang terdiri atas:

- a. Lalu lintas 500,000 CESA.
- b. Lalu lintas 200,000 CESA
- c. Lalu lintas 300,000 CESA

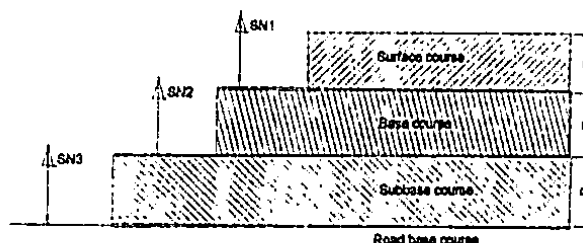
Sedangkan untuk metoda perhitungan yang digunakan adalah metoda AASHTO'93 dengan mengambil parameter-parameter sebagai berikut:

- a. Initial Present Serviceability Index (P_o) = 4.0
- b. Failure Serviceability Index (P_f) = 2.0
- c. Terminal Serviceability Index (P_t) = 1.5
- d. Standard Deviate (S_o) = 0.45
- e. Reliability = 95% sehingga $Z_r = -1.645$

Untuk bahan pembentuk perkerasan digunakan sebagai berikut:

- a. Lapisan aus terdiri dari AC WC dengan Modulus Elastisitas 2,000 MPa dan *layer coefficient* $a = 0.40$.
- b. Lapis pondasi beraspal terdiri dari AC Base dengan Modulus Elastisitas 1,500 MPa dan *layer coefficient* $a = 0.30$.
- c. Lapis pondasi berbutir terdiri dari Lapis Pondasi Atas dengan CBR 90% dan Modulus Elastisitas 200 MPa (dari hubungan CBR dan modulus merujuk pada AASHTO'93) dan *layer coefficient* 0.13.
- d. Tanah dasar dengan CBR 6% dan Modulus Elastisitas 60 MPa.

Perhitungan dasar dari metoda AASHTO'93 mengikuti ketentuan dasar yang diperlihatkan pada Gambar 4.24 berikut ini:



Gambar 4.24 Ketentuan Berapannya Menurut AASHTO'93

Sedangkan parameter-parameter tersebut diberikan pada persamaan berikut ini :

$$D^*_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \quad (4.34)$$

$$SN^*_1 = a_1 D^*_1 \geq SN_1 \quad (4.35)$$

$$D^*_2 \geq \frac{SN_2 - SN^*_1}{a_2} \quad (4.36)$$

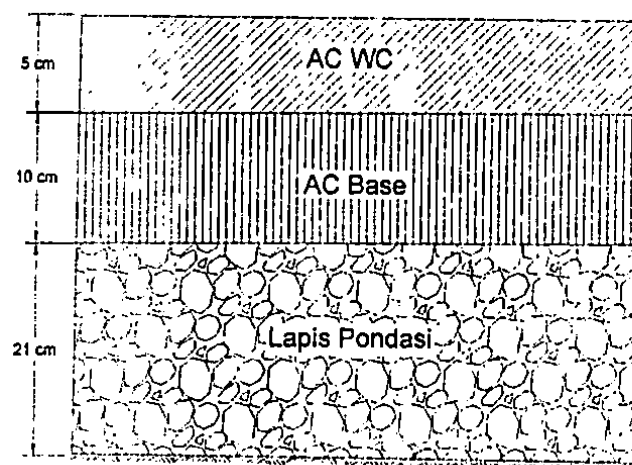
$$SN^*_1 + SN^*_2 \geq SN_2 \quad (4.37)$$

$$D^*_3 \geq \frac{SN_3 - (SN^*_1 + SN^*_2)}{a_3} \quad (4.38)$$

Tanda asterisk (*) pada D dan SN mengindikasikan suatu nilai actual yang digunakan yang nilainya harus sama dengan atau lebih besar dari nilai yang disyaratkan.

a. Alternatif 1 (500,000 CESA)

Perhitungan dan hasil dari perencanaan tebal perkerasan untuk lalu lintas 500,000 CESA diberikan berikut ini.



Sub Grade CBR >= 6%

Alternatif 1

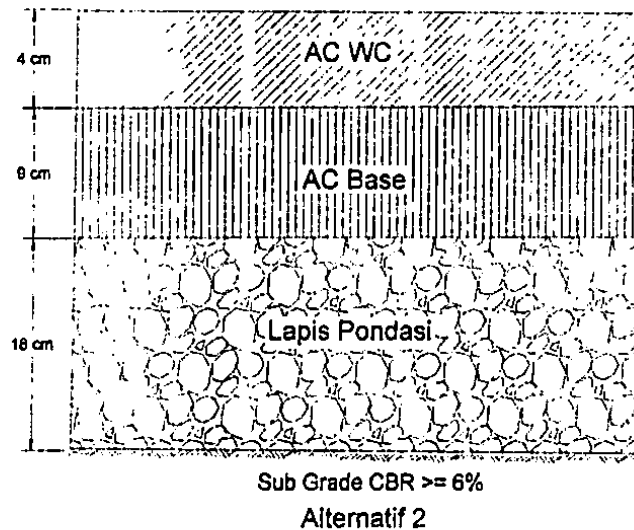
Tabel 4.3. Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 1

SN	Design life = 500,000 CESA	a	D (inchi)	D (cm)
SN1	0.75	0.40	2.0	5.0
SN2	1.95	0.30	3.9	10.0
SN3	3.00	0.13	8.3	21.0

D*1 (cm)	\geq	4.8	OK, karena terpasang 5 cm
SN*1	=	0.8	OK, karena besar sama dengan SN1
D*2 (cm)	\geq	9.8	OK, karena terpasang 10 cm
SN*1+SN*2	=	2.0	OK, karena lebih besar dari SN2
D*3 (cm)	\geq	20.2	OK, karena terpasang 21 cm

b. Alternatif 2 (200,000 CESA)

Perhitungan dan hasil dari perencanaan tebal perkerasan untuk lalu lintas 200,000 CESA diberikan berikut ini.



Gambar 4.26. Sistem perkerasan untuk 200.000 CESA

Tabel 4.4 Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 2

SN	Design life = 200,000 CESA	a	D (inchi)	D (cm)
SN1	0.60	0.40	1.6	4.0
SN2	1.65	0.30	3.5	9.0
SN3	2.60	0.13	7.1	18.0

D*1 (cm)	>=	3.8	OK, karena terpasang 4 cm
SN*1	=	0.6	OK, karena besar sama dengan SN1
D*2 (cm)	>=	8.6	OK, karena terpasang 9 cm
SN*1+SN*2	=	1.7	OK, karena lebih besar dari SN2
D*3 (cm)	>=	17.7	OK, karena terpasang 18 cm

c. Alternatif 3 (300,000 CESA)

Jalan percobaan UMY berlokasi di kampus UMY di jalan Lingkar Utara Yogyakarta. Jalan percobaan ini dibuat untuk rencana lalu lintas sedang dengan nilai kumulatif beban gandar standar ekivalen sebesar 300.000 ESA. Untuk metoda perhitungan yang digunakan adalah metoda AASHTO'93 dengan mengambil parameter-parameter sebagai berikut:

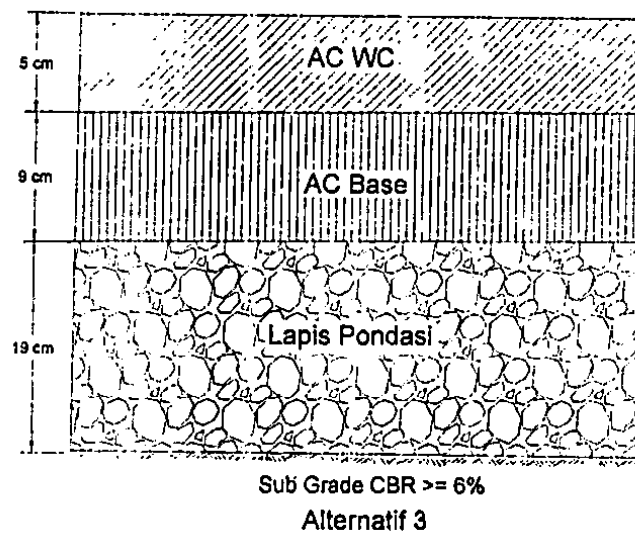
- Initial Present Serviceability Index (P_o) = 4.0
- Failure Serviceability Index (P_f) = 2.0
- Terminal Serviceability Index (P_t) = 1.5
- Standard Deviate (S_o) = 0.45
- Reliability = 95%, hal ini memberikan nilai $Z_r = -1.645$

Untuk bahan pembentuk perkerasan digunakan sebagai berikut:

- Lapisan aus terdiri dari AC WC dengan Modulus Elastisitas 2,000 MPa dan layer coefficient $a = 0.40$.
- Lapis pondasi beraspal terdiri dari AC Base dengan Modulus Elastisitas 1,500 MPa dan layer coefficient $a = 0.30$.

- Lapis pondasi berbutir terdiri dari Lapis Pondasi Atas dengan CBR 90% dan Modulus Elastisitas 200 Mpa (dari hubungan CBR dan modulus di buku AASHTO'93) dan layer coefficient 0.13.
- Tanah dasar dengan CBR sebesar 6% dan Modulus Elastisitas 60 MPa.

Perhitungan dan hasil dari perencanaan tebal perkerasan untuk lalu lintas 300,000 CESA diberikan berikut ini.



Gambar 4.27. Sistem perkerasan untuk 300,000 CESA

Tabel 4.5 Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 3

SN	Design life = 300,000 CESA	a	D (inchi)	D (cm)
SN1	0.65	0.40	2.0	5.0
SN2	1.80	0.30	3.5	9.0
SN3	2.80	0.13	7.5	19.0

D*1 (cm)	\geq	4.1	OK, karena terpasang 5 cm
SN*1	=	0.8	OK, karena besar sama dengan SN1
D*2 (cm)	\geq	8.6	OK, karena terpasang 9 cm
SN*1+SN*2	=	1.9	OK, karena lebih besar dari SN2
D*3 (cm)	\geq	18.6	OK, karena terpasang 19 cm

2). Implementasi Ukuran Model

Untuk model perkerasan yang dibuat didasarkan pada asumsi lalu lintas rendah yang sebagaimana dijelaskan pada perhitungan di atas. Mengingat, tidak dilakukannya model pembebanan lalu lintas pada model perkerasan di penelitian tahun pertama ini, dan hanya mempertimbangkan parameter variasi tebal lapisan perkerasan dan variasi bahan penyusun terkontrol pada model fisik perkerasan untuk menentukan kebolehan sistem SASW terpadu yang dikaji, maka variasi tebal lapisan permukaan AC pada model perkerasan jalan menjadi pertimbangan. Dengan mengambil sistem perkerasan alternatif ke-2 (Gambar 4.26) dengan tebal perkerasan pada sistem ideal adalah 13 cm, maka tebal lapisan permukaan perkerasan terpasang pada model adalah 3 cm dan 5 cm. Tabel 4.6 berikut ini menjelaskan variasi pemodelan fisik yang digunakan.

Tabel 4.6. Penyesuaian Skala Model dan Jenis Perkerasan

Model Fisik No.	1	2
Lapisan Permukaan Aspal	AC* = 3 cm**	AC = 5 cm
	ATB = 3 cm	ATB = 5 cm
Lapisan AC Base	AC = 15 cm	AC = 15 cm
Lapisan Fondasi	Batu Pecah = 15 cm	Batu Pecah = 15 cm
Lapisan Tanah Dasar Dipadatkan	20 cm	20 cm

Keterangan :

Jumlah Model Fisik Perkerasan Jalan = 4 jenis model perkerasan jalan

*Perimbangan penggunaan lapisan AC (Asphalt Concrete) dan ATB (Asphalt Treatment Base) dalam penelitian ini adalah kedua jenis campuran ini digunakan sebagai base perkerasan jalan di Indonesia

2. Pengujian Bahan Model Perkerasan Jalan

Pengujian bahan pada model perkerasan jalan ini bertujuan untuk mendapatkan variabel bahan yang terkontrol sebagai indikator pengukur hasil kajian ini. Jenis pengujian bahan, spesifikasi rujukan dan beberapa penjelasan pengujian bahan diberikan dalam Tabel 4.7, hingga 4.9 berikut ini.

a. Spesifikasi Aspal

Aspal yang digunakan adalah Aspal Penetrasi 60/70 keluaran dari Pertamina. Pengujian dasar terhadap sifat-sifat aspal untuk model dan spesifikasinya yang digunakan diberikan pada Tabel 4.13 berikut ini.

Tabel 4.7 Persyaratan aspal keras penetrasi 60/70

No.	Jenis Pengujian	Metode	Persyaratan
1.	Penetrasi, 25 °C; 100 gr; 5 detik; 0,1 mm	SNI 06-2456-1991	60 - 79
2.	Titik Lembek, °C	SNI 06-2434-1991	48 - 58
3.	Titik Nyala, °C	SNI 06-2433-1991	Min. 200
4.	Daktalitas 25 °C, cm	SNI 06-2432-1991	Min. 100
5.	Berat jenis	SNI 06-2441-1991	Min. 1,0
6.	Viskositas aspal, cSt	ASTM E-102	---

b. Spesifikasi untuk Agregat Kasar dan Agregat Halus untuk Campuran

Standar pengujian dan spesifikasi agregat kasar dan agregat halus yang digunakan baik untuk lapisan AC dalam penelitian ini diberikan pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 berikut ini.

Tabel 4.8 Ketentuan agregat kasar

Pengujian	Standar	Nilai
Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 03-2417-1991	Maks. 40 %
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 03-2439-1991	Min. 95 %
Angularitas (kedalaman dari permukaan < 10 cm)	DoT's Pennsylvania Test Method, PTM No.621	95/90
Angularitas (kedalaman dari permukaan ≥ 10 cm)		80/75
Partikel Pipih dan Lonjong*	ASTM D-4791	Maks. 10 %
Material lolos Saringan No.200	SNI 03-4142-1996	Maks. 1 %

Catatan : 80/75 menunjukkan bahwa 80 % agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 75% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

*) Pengujian dengan perbandingan lengan alat uji terhadap poros 1 : 5

Tabel 4.9 Ketentuan agregat halus

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50 %
Material Lolos Saringan No. 200	SNI 03-4428-1997	Maks. 8%,
Angularitas (kedalaman dari permukaan < 10 cm)	ASTM C-1252	Min 45
Angularitas (kedalaman dari permukaan \geq 10 cm)		Min 40

c. Gradasi Butiran

Gradasi untuk campuran yang dibuat baik untuk AC WC, AC Binder, maupun AC Base diberikan pada Tabel 4.10 berikut ini.

Tabel 4.10 Gradasi Agregat Untuk Campuran Aspal

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos						
		Latasir (SS) ¹		Lataston (HRS)		LASTON (AC) ²		
ASTM	(mm)	Kelas A	Kelas B	WC	Base	WC	BC	Base
1½"	37,5							100
1"	25						100	90 - 100
¾"	19	100	100	100	100	100	90 - 100	Maks.90
½"	12,5			90 - 100	90 - 100	90 - 100	Maks.90	
3/8"	9,5	90 - 100		75 - 85	65 - 100	Maks.90		
No.8	2,36		75 - 100	50 - 72	35 - 55	28 - 58	23 - 49	19 - 45
No.16	1,18							
No.30	0,600			35 - 60	15 - 35			
No.200	0,075	10 - 15	8 - 13	6 - 12	2 - 9	4 - 10	4 - 8	3 - 7
						DAERAH LARANGAN		
No.4	4,75					-	-	39,5
No.8	2,36					39,1	34,6	26,8 - 30,8
No.16	1,18					25,6 - 31,6	22,3 - 28,3	18,1 - 24,1
No.30	0,600					19,1 - 23,1	16,7 - 20,7	13,6 - 17,6
No.50	0,300					15,5	13,7	11,4

Catatan :

1. Untuk HRS-WC dan HRS-Base, paling sedikit 80 % agregat lolos ayakan No.8 (2,36 mm) harus juga lolos ayakan No.30 (0,600 mm). Kriteria gradasi senjang yang lolos ayakan No.8 (2,36 mm) dan tertahan ayakan No.30 (0,600 mm) dalam Tabel 6.3.2.(5).
2. Untuk AC, digunakan titik kontrol gradasi agregat, berfungsi sebagai batas-batas rentang utama yang harus ditempati oleh gradasi-gradasi tersebut. Batas-batas gradasi ditentukan pada ayakan ukuran nominal maksimum, ayakan menengah (2,36 mm) dan ayakan terkecil (0,075 mm).

d. Spesifikasi Campuran AC WC, AC Binder dan AC Base

Ketentuan campuran AC WC, AC Binder, dan AC Base ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut ini.

Tabel 4.11 Ketentuan sifat-sifat campuran AC (Laston)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		WC	BC	Base
Penyerapan Aspal (%)	Max	1,2		
Jumlah tumbukan per bidang		75	112 (1)	
Rongga dalam campuran (%) (3)	Min	3,5		
	Max	5,5		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Rongga terisi aspal (%)	Min	65	63	60
Stabilitas Marshall (%)	Min	800		1500(1)
	Max	-		-
Pelelehan (mm)	Min	3		5(1)
Marshall Quotient (kg/mm)	Min	250		300
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C (4)	Min	75		
Rongga dalam campuran (%) pada (2) Kepadatan membal (refusal)	Min	2,5		

e. Spesifikasi Lapis Pondasi Agregat

Ketentuan Gradasi dan karakteristik Lapis Pondasi Agregat Kelas A dan B diberikan pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Gradasi lapis pondasi agregat

Ukuran Ayakan		Persen Berat Yang Lolos, % lolos	
ASTM	(mm)	Kelas A	Kelas B
2"	50		100
1½"	37,5	100	88 - 95
1"	25,0	79 - 85	70 - 85
¾"	19,0	44 - 58	30 - 65
No.4	4,75	29 - 44	25 - 55
No.10	2,0	17 - 30	15 - 40
No.40	0,425	7 - 17	8 - 20
No.200	0,075	2 - 8	2 - 8

Tabel 4.13 Sifat-sifat lapis pondasi agregat

Sifat - sifat	Kelas A	Kelas B
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 03-2417-1990)	maks 40 %	maks 40 %
Indek Plastisitas (SNI-03-1966-1990)	maks 6	4- 10
Hasil kali Indek Plastisitas dng. % Lolos Ayakan No.200	maks. 25	-
Batas Cair (SNI 03-1967-1990)	maks 25	maks 35
Bagian Yang Lunak (SK SNI M-01-1994-03)	maks 5 %	maks 5 %
CBR (SNI 03-1744-1989)	min.90 %	min. 65 %

f. Spesifikasi Tanah Dasar (Sub Grade)

Bahan subgrade berupa timbunan biasa dengan persyaratan sebagai berikut:

- Bahan yang dipilih tidak termasuk tanah yang berplastisitas tinggi, yang diklasifikasikan sebagai A-7-6 menurut AASHTO M145. Tanah plastis seperti itu sama sekali tidak boleh digunakan pada 30 cm lapisan langsung di bawah bagian dasar perkerasan atau bahu jalan atau tanah dasar bahu jalan. Sebagai tambahan, timbunan untuk lapisan ini bila diuji dengan SNI 03-1744-1989, harus memiliki CBR tidak kurang dari 6 % setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100 % kepadatan kering maksimum (MDD) seperti yang ditentukan oleh SNI 03-1742-1989.
- Tanah sangat expansive yang memiliki nilai aktif lebih besar dari 1,25 atau derajat pemampatan yang diklasifikasikan oleh AASHTO T258 sebagai "very high" atau

“extra high”, tidak boleh digunakan sebagai bahan timbunan. Nilai aktif adalah perbandingan antara Indeks Plastisitas (SNI 03-1967-1990 dan SNI 03-1966-1990) dengan prosentase kadar lempung (SNI 03-3423-1994)

- Bahan subgrade yang digunakan dalam model perkerasan di penelitian ini merupakan tanah dasar dan timbunan dari lokasi pembuatan model di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Tanah diketahui dari peta geologi dan data pengeboran merupakan tanah berpasir padat dengan nilai indeks plastisitas sangat rendah (Lampiran II).

g. Pengukuran Modulus di Lapangan

- **Modulus Lapisan Beraspal**

Dari contoh job mix formula dilakukan pengujian UTM sehingga didapat nilai modulus elastisitas dari campuran beraspal untuk lapisan permukaan model. Untuk modulus lapangan terpasang dianggap sama dengan modulus yang didapat dari hasil pengujian UTM (hal ini bisa dianggap sama apabila pengontrolan pemadatan pada saat konstruksi benar-benar bisa dilakukan dengan baik). Untuk model perkerasan diambil beberapa contoh uji dari hasil pemadatan Marshall (benda uji yang digunakan sama dengan benda uji Marshall). Pengujian modulus elastisitas campuran beraspal ini sebaiknya dilakukan pada temperatur ruang (25° C) untuk memperkirakan modulus existing dari campuran beraspal yang terhampar di lapangan. Brown & Foo (1999) menjelaskan bahwa pengukuran modulus elastisitas dengan pendekatan modulus resilien menggunakan *indirect tensile* memberikan hasil yang baik untuk menggambarkan perilaku beban pulsa berulang yang diasumsikan sebagai beban lalu lintas. Metode pengujian modulus resilien dalam penelitian ini merujuk pada ASTM D 4123.

- **Modulus Lapis Pondasi Atas dan Tanah Dasar**

Sebelum pelaksanaan konstruksi model, contoh kuari dilakukan pengujian CBR di laboratorium. Nilai modulus ini dianggap bisa tercapai di lapangan pada saat selesai konstruksi apabila pemadatan bisa dilakukan dengan baik. Untuk mengetahui nilai modulus terpasang pada model dalam penelitian ini, pengujian DCP (dynamic cone penetrometer) juga digunakan. Pengujian DCP adalah suatu metode lapangan destruktif yang bertujuan untuk menilai ketebalan dan kapasitas bahan lapisan fondasi dan tanah dasar jalan. Klyen & van Heerden (1983) memberikan persamaan empirik yang

Model empirik yang dihasilkan merumuskan hubungan diantara kedua-dua pengukuran sebagai :

$$\text{Log CBR} = 2.628 - 1.273 \text{ Log DCP} \quad (4.39)$$

dengan, DCP dinyatakan sebagai nilai penetrasi (mm/pukulan) dan nilai CBR dalam unit %.

h. Lokasi Pengujian Bahan

Dalam penelitian ini, pengujian bahan model perkerasan jalan dilakukan pada beberapa laboratorium bahan sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 4.14.

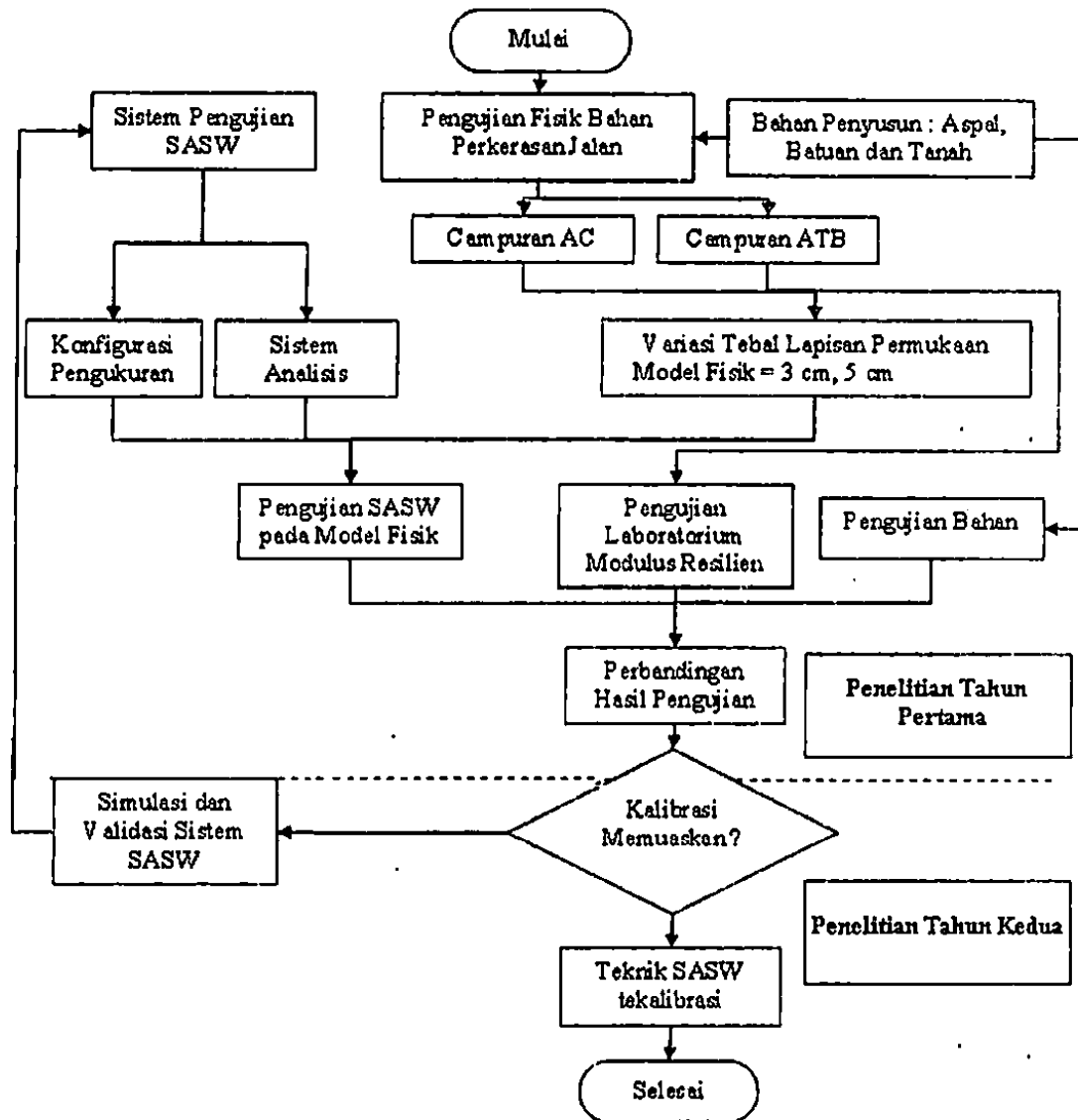
Tabel 4.14 Lokasi pengujian bahan model perkerasan jalan

Lokasi Pengujian	Jenis Pengujian
1. Laboratorium Teknik Transportasi, Divisi Bahan Perkerasan Jalan, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta	<ul style="list-style-type: none"> • Pengujian dasar aspal: penetrasi, berat jenis, daktilitas, titik lembek dan nyala. • Pengujian dasar agregat: gradasi butiran, pemadatan, CBR, DCP, abrasi, fraksi lolos No.200, indeks pipih • Pengujian tanah dasar: gradasi butiran, pemadatan, CBR, DCP, indeks plastisitas. • Pengujian Marshall: pembuatan benda uji
2. Laboratorium Teknik Transportasi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta	Pengujian Marshall: Stabilitas, MQ, Flow, VITM dan VFWA
3. Laboratorium Teknologi Minyak Bumi, Gas dan Batubara, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta	Pengujian Viskositas Kinematik Aspal.
4. Balai Bahan dan Perkerasan Jalan (BBPJ) Puslitbang Jalan dan Jembatan Bandung	Pengujian Modulus Resilien

3. Penentuan Parameter Ukur dalam Pengujian SASW

Gambar 4.28 menunjukkan alur penelitian dalam konteks pengujian SASW di model perkerasan yang telah dilaksanakan dan rencana pelaksanaan lanjutan yaitu proses kalibrasi teknik SASW yang akan dijalankan pada tahun kedua. Pengujian SASW dilakukan pada setiap model fisik. Selanjutnya hasil modulus elastisitas yang diperoleh dibandingkan

faktor yang mempengaruhi yaitu sifat mekanis pengujian, pengaruh reologi bahan, pengaruh suhu dan pengaruh pengontrolan. Pembahasan hasil perbandingan ini dijelaskan secara terperinci pada Bab IV laporan penelitian ini.



Gambar 4.28 Skematik alur pengujian SASW pada model perkerasan pada tahun penelitian I dan rencana tahun penelitian II

Sebelum dilakukan pengujian SASW pada model, pemilihan konfigurasi dan penetapan jarak sensor perlu terlebih dulu dilakukan. Dalam penelitian ini, konfigurasi pengukuran yang digunakan dalam pengujian SASW yaitu geometrik titik tengah (*common mid point* (CMP))

atau geometrik titik tengah sensor (*common receiver mid point*, CRMP) dan geometrik susunan 3 sensor untuk integrasi dengan impact echo.

- **Pengaturan Jarak antara Sumber Gelombang dan Sensor**

Pengaturan ini jarak terpendek di antara sumber gelombang dan sensor terdekatnya perlu diambil lakukan supaya energi gelombang tubuh boleh teredam (*damped*) sebelum sampai pada sensor pertama atau minimal tidak memberikan efek yang besar. Jarak antara sensor terpanjang juga direncanakan sebelum melakukan pengujian dengan mempertimbangkan kemampuan gelombang R untuk mendapatkan sample lapisan terdalam yang dikehendaki. Dalam penelitian ini, jarak di antara sensor adalah sama dengan jarak di antara sumber gelombang terhadap sensor terdekat mengikuti kriteria Heisey (1982).

Dalam penelitian ini, panjang gelombang R dianggarkan supaya dapat mengambil sample bahan pada seluruh profil lapisan perkerasan pada kedalaman di antara 50 hingga 2000 mm untuk model pertama dan di antara 30 hingga 2000 mm untuk model perkerasan kedua. Berdasarkan ini, maka jarak sensor minimum dan maksimum ditentukan sebagai berikut:

- a. **Jarak Pengesan Terpendek**

Untuk panjang gelombang terpendek, jarak sensor dihitung sebagai satu hingga tiga kali panjang gelombang minimum. Untuk penelitian ini, wilayah ukuran minimum jarak sensor terpendek ditentukan sebagai 50 hingga 150 mm ($1\sim3 \times 50$ mm) berdasarkan Heisey (1982), Nazarian (1984), Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Apabila spektrum beza fasa yang diukur menunjukkan kualitas sinyal yang baik hanya dengan satu siklus saja, maka jarak sensor yang diperlukan untuk mengukur gelombang dengan panjang 50 mm sebaiknya adalah lebih pendek daripada satu kali panjang gelombang minimum (50 mm).

b. Jarak Pengesan Terpanjang

Untuk membangkitkan gelombang yang terpanjang, jarak sensor yang diperlukan adalah antara 700 hingga 1000 mm. Nilai ini didapatkan dari nilai $\frac{1}{2}$ hingga $\frac{1}{3}$ (2000 mm) panjang gelombang yang direncanakan. Untuk memudahkan pelaksanaan pengujian di lapangan, jarak terpanjang ditentukan sebagai 1000 mm.

Setelah jarak sensor minimum dan maksimum diperoleh sebesar 50 mm dan 1000 mm untuk model pertama dan 30 mm dan 1000 mm untuk model kedua, ukuran jarak lainnya ditentukan secara berganda. Dengan demikian, satu set jarak sensor untuk model pertama (lapisan permukaan 5 cm) adalah 50, 100, 200, 400, 800 dan 1000 mm; sedangkan untuk model kedua (lapisan permukaan 3 cm) adalah 30, 60, 120, 240, 480 dan 1000 mm. Sistem pengukuran ini dimaksudkan untuk memperoleh overlapping gelombang yang cukup untuk mendapatkan kurva dispersi yang baik.

- **Julat Frekuensi yang Dikehendaki**

Setelah set jarak di antara sensor ditentukan, wilayah frekuensi sumber gelombang pula perlu direncanakan untuk mendapatkan gelombang permukaan yang dikehendaki. Sebagai contoh diambil jarak sensor 200 mm, yang direncanakan mampu mengambil samal gelombang untuk lapisan fondasi dengan kecepatan gelombang geser 500 m/s untuk panjang gelombang yang dipilih pada $\frac{1}{3}$ hingga 2 kali jarak sensor yang. Nilai

... ..

$$f_{\text{maksimum}} = \frac{(500 \times 0.9)}{\left\{ \frac{0.2}{3} \right\}} = 6750 \text{ Hz} \quad (4.41)$$

$$f_{\text{minimum}} = \frac{(500 \times 0.9)}{0.2 \times 2} = 1125 \text{ Hz} \quad (4.42)$$

Selengkapnya untuk seluruh lapisan model perkerasan jalan dalam penelitian ini diberikan dalam Tabel 4.15. Hasil Tabel 4.15 ini juga sebagai rujukan untuk memilih sumber gelombang dengan frekuensi yang sesuai sebagaimana telah dihitung dan diberikan dalam Tabel 4.1. Panduan pemilihan sumber gelombang berdasarkan disain wilayah frekuensi diberikan dalam Tabel 4.15. Meskipun demikian, evaluasi terhadap kualitas sinyal, faktor gangguan lingkungan (gangguan sinyal dari instrumen elektrik dan *groundroll*) dan pengalaman penguji sangat mempengaruhi pemilihan sumber gelombang di lapangan.

Tabel 4.15 Perencanaan wilayah frekuensi untuk pengujian

Jarak Sensor (mm)	V_s rencana (m/s)	Wilayah frekuensi (Hz)	Sumber gelombang terpilih (Tabel 4.1)
30-50	1000	9000 – 54000	Bola baja 5 g
60-100	1000	4500 – 27000	Bola baja 15 hingga 30 g
120-200	500	1125 – 6750	Bola baja 65 g dan palu 0.20 kg
240-400	500	562.5 – 3375	Palu 0.58 kg
480-800	300	168.75 – 1012.5	Palu 2 kg dan 4.87 kg
1000	300	84.375 – 506.25	Palu 2 kg dan 4.87 kg