

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENGANTAR

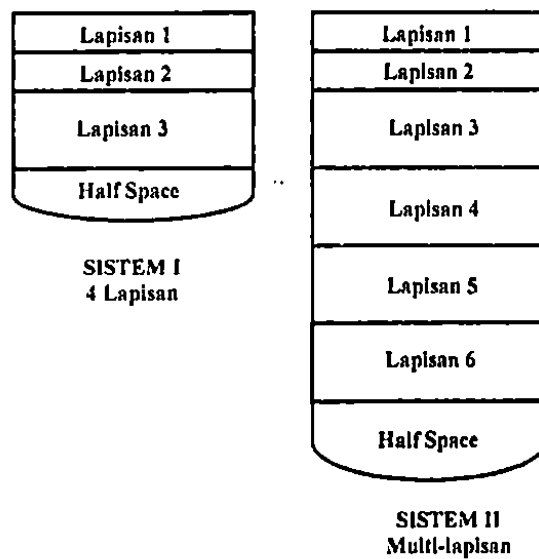
Pada bab ini dipresentasikan seluruh hasil penelitian dan pembahasannya. Pemaparan hasil studi dimulai dengan hasil simulasi model 2 D dan 3 D yang dijadikan pendekatan dalam penelitian ini untuk mendapatkan kurva dispersi kecepatan fase teori yang diperlukan dalam analisis SASW. FEM juga diterapkan untuk mengvalidasi hasil simulasi analitik tersebut. Bagian kedua adalah mengetengahkan pembangunan model fisik dan beberapa hasil dari pengujian bahan yang dilakukan. Parameter bahan seperti modulus resilien dan Marshall juga dipresentasikan sebagai parameter kontrol hasil analisis SASW. Selanjutnya hasil analisis gelombang dan penentuan profil akhir model perkerasan melalui pengujian SASW disampaikan secara detil. Pada bagian akhir bab ini disampaikan perbandingan antara hasil pengujian SASW dan parameter bahan yang diperoleh dari pengujian laboratorium. Proses perbandingan dilakukan untuk mengetahui kesesuaian hasil pengujian dan sebagai bahan kalibrasi sistem SASW yang diusulkan untuk tahapan penelitian selanjutnya. Hasil akhir pembahasan bab ini adalah uraian mengenai sistem SASW terpadu yang digunakan dalam penelitian ini.

B. SIMULASI MODEL 2 D DAN 3 D PADA STRUKTUR PERKERASAN JALAN

1. Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen

Pada bagian ini, simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan pada model buatan (simulasi) atau disebut sebagai model artificial yang memiliki karakteristik lapisan homogen atau memiliki sifat kekakuan bahan yang sama dan reguler atau teratur. Sistem pertama merupakan balok beton yang tersusun dalam tiga lapisan beton (Gambar 5.1) dengan karakteristik dinamik sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 5.1. Untuk sistem kedua disusun profil balok beton dengan sistem 5 lapisan, sedangkan sistem ketiga disusun dalam profil 6 lapisan (Gambar 5.1). Karakteristik dinamik untuk sistem kedua dan ketiga selengkapnya dijelaskan dalam Tabel 5.2 dan Tabel 5.3. Ketiga sistem tersebut

kekakuan dinamik. Nilai lapisan tak terhingga tersebut tidak mempengaruhi analisis setiap lapisan profil di atas. Proses simulasi dimulai dengan penyusunan parameter model awal (*starting model parameter, SMP*).



Gambar 5.1 Sistem Profil Model Awal untuk Proses Simulasi 2 D dan 3 D pada Profil Artifisial Reguler dan Homogen

Tabel 5.1 Karakteristik lapisan pada sistem 1

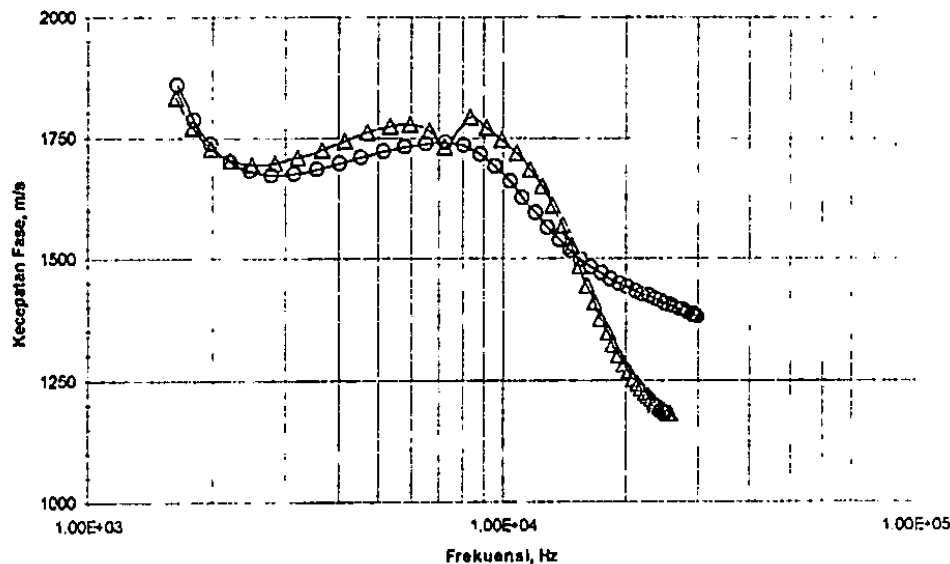
No Lapisan	Ketebalan m	V_P m/s	V_S m/s	γ kg/m ³	ν ---	D ---
1	0,1	3095,45	1787,16	2400	0,25	0,02
2	0,1	3730,61	2153,87	2400	0,25	0,02
3	0,2	2202,99	1271,9	2400	0,25	0,02
Half Space	40	640,009	369,509	2400	0,25	0,02

Tabel 5.2 Karakteristik lapisan pada sistem 2

No Lapisan	Ketebalan m	V_P m/s	V_S m/s	γ kg/m ³	ν ---	D ---
1	0,01	2100,946	1212,982	2400	0,25	0,02
2	0,02	2127,032	1228,043	2400	0,25	0,02
3	0,1	3842,486	2218,461	2400	0,25	0,02
4	0,1	3932,109	2270,204	2400	0,25	0,02
5	0,2	2515,511	1452,331	2400	0,25	0,02
6	0,2	5086,213	2936,526	2400	0,25	0,02
Half Space	63	5313,168	3067,559	2400	0,25	0,02

Untuk menguji resolusi dan ketepatan hasil simulasi model, dalam studi ini digunakan

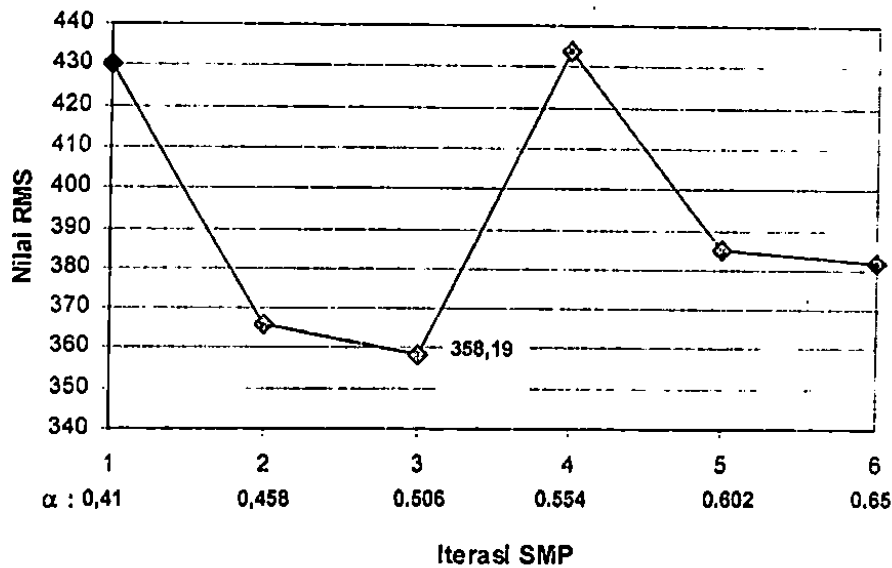
seismik (Gambar 5.3). Data dummy yang digunakan berupa kurva eksperimen tersebut menggambarkan hubungan antara kecepatan fase terhadap nilai frekuensinya. Nilai kecepatan fase yang ditunjukkan mengindikasikan nilai kecepatan fase yang hampir seragam yang dimisalkan sebagai profil perkerasan jalan yang cenderung homogen.



Gambar 5.2 Kurva eksperimen kecepatan fase dari Rosyidi et al. (2005)

1.1 Hasil Simulasi Model 2 D

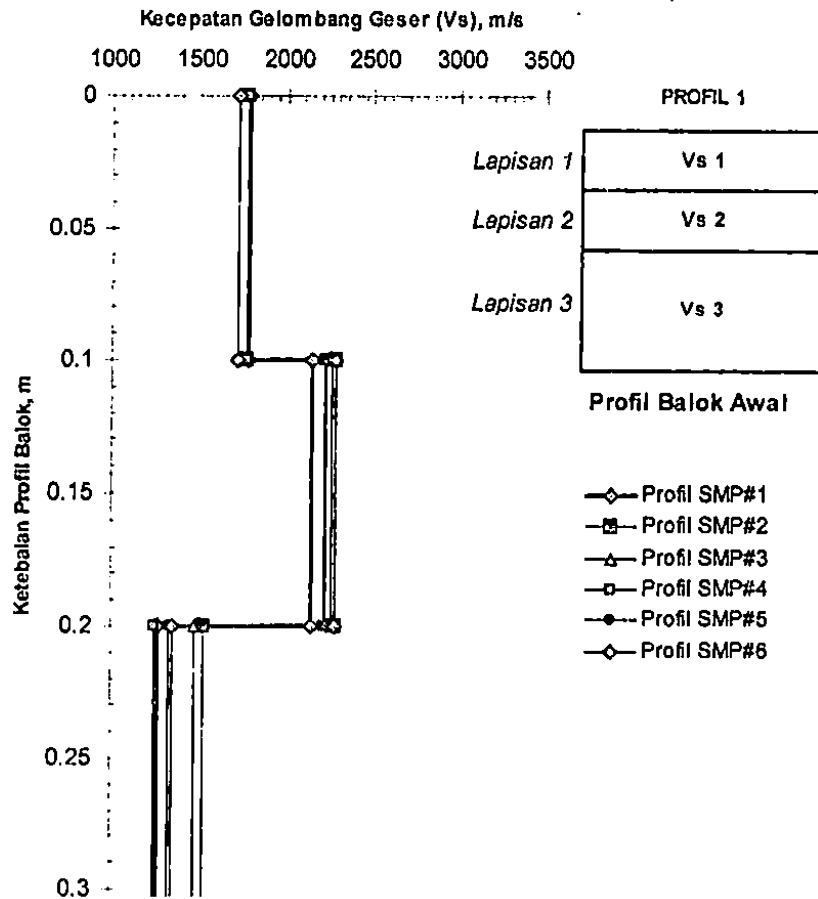
Berdasarkan profil model 1 yang terdiri dari profil 3 lapisan, dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai parameter model awal (SMP) yang memiliki rasio λ (panjang gelombang) terhadap H (tebal seluruh lapisan profil) yang optimum. Nilai rasio ditetapkan antara nilai 0,41 hingga nilai 0,65 dengan 6 iterasi profil SMP. Penetapan rasio $\lambda - H$ ini berdasarkan wilayah optimasi yang telah direkomendasikan oleh Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Gambar 5.3 menunjukkan nilai RMS dari hasil analisis SMP dengan berbagai variasi nilai rasio $\lambda - H$. Nilai RMS terkecil (259,10 m/s) terletak pada



Gambar 5.3 Grafik Profil SMP untuk variasi rasio $\lambda - H$

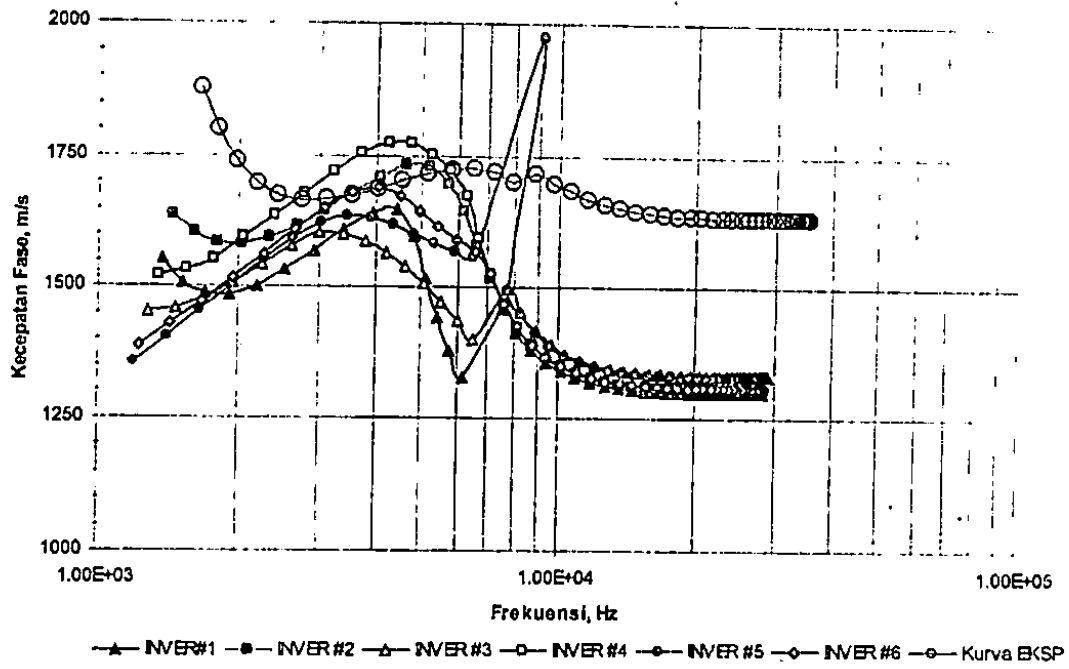
Profil SMP untuk seluruh nilai rasio $\lambda - H$ diberikan dalam Gambar 5.4. Dari profil SMP pertama hingga keenam, secara umum, memiliki trend profil yang hampir sama terutama pada lapisan pertama profil model. Untuk lapisan ketiga profil model terlihat sangat bervariasi antara kecepatan gelombang geser 1272 – 1537 m/s. Meskipun demikian, profil SMP yang digunakan untuk proses simulasi matrik kekakuan 2 D selanjutnya adalah profil SMP dengan nilai RMS terkecil yaitu profil SMP ke-3.

Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 menunjukkan hasil simulasi model matrik kekakuan 2 D berupa kurva kecepatan fase teori. Simulasi dilakukan sebanyak 10 kali iterasi dengan melakukan perubahan nilai kecepatan gelombang geser pada ketiga lapisan profil model balok. Analisis optimasi dalam proses ini dilakukan dengan algoritma kemiripan maksimum menggunakan software Matlab dan WinSASW versi 2.0.1 sebagaimana telah

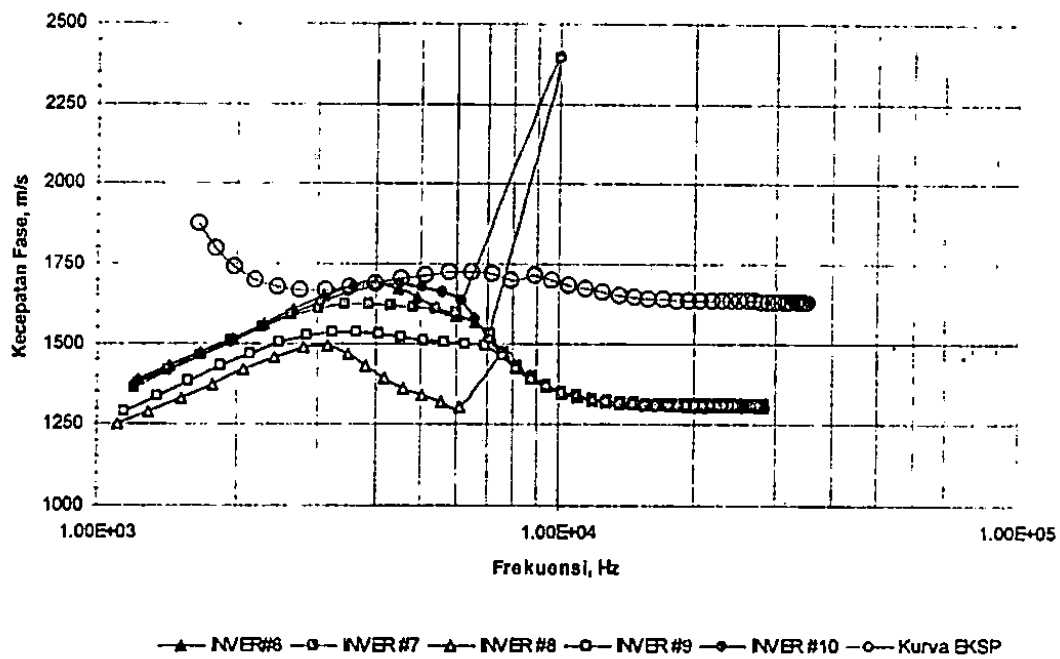


Gambar 5.4 Profil SMP Analisis 2 D untuk variasi rasio $\lambda - H$ pada model 1

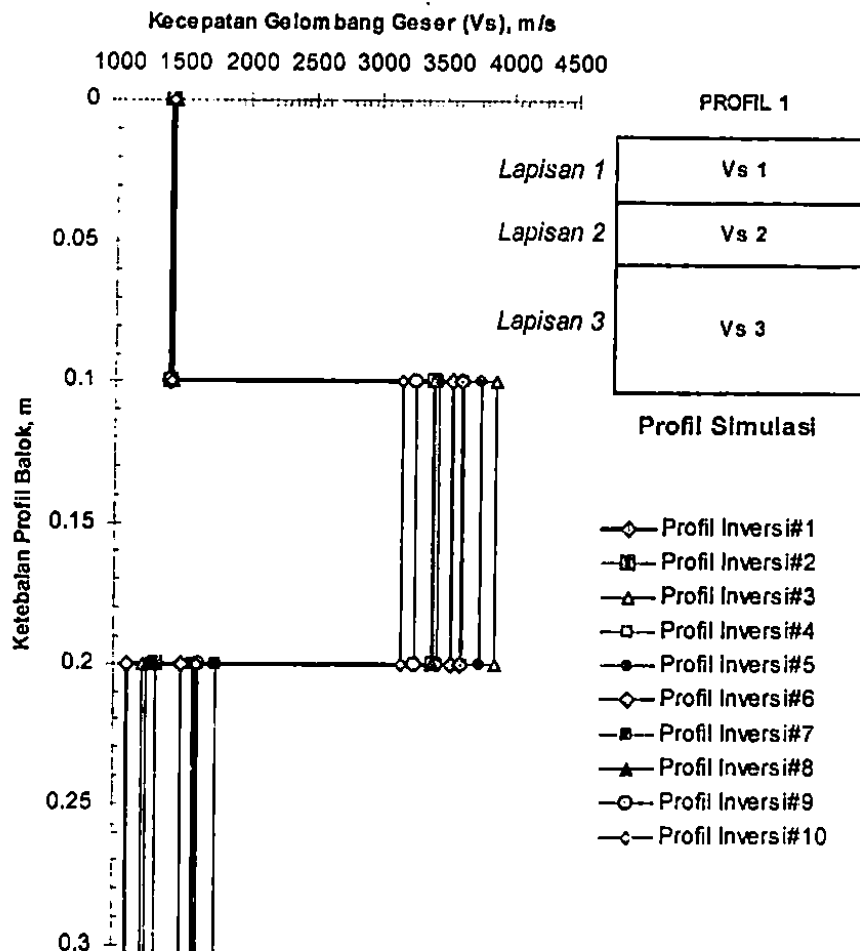
Hasil simulasi 2 D menunjukkan bahwa kesepuluh iterasi kurva teoritik yang dilakukan tidak dapat mendekati kurva eksperimen dengan baik. Dengan perbedaan minimum yang dapat dicapai antara kurva eksperimen dan kurva teori hasil simulasi dalam nilai RMS mencapai sebesar 204,71 m/s oleh profil iterasi ke-10. Dari Gambar 5.6 terlihat bahwa kurva teoritik hasil simulasi 2 D ke-10 hanya dapat sesuai (*matched*) pada nilai frekuensi antara 2000 hingga 5000 Hz dengan nilai kecepatan geser gelombang pada 1450 hingga



Gambar 5.5 Profil SMP 1 hingga SMP 6 analisis 2 D untuk model 1



Gambar 5.6 Profil SMD 6 hingga SMD 10 untuk analisis 2 D model 1

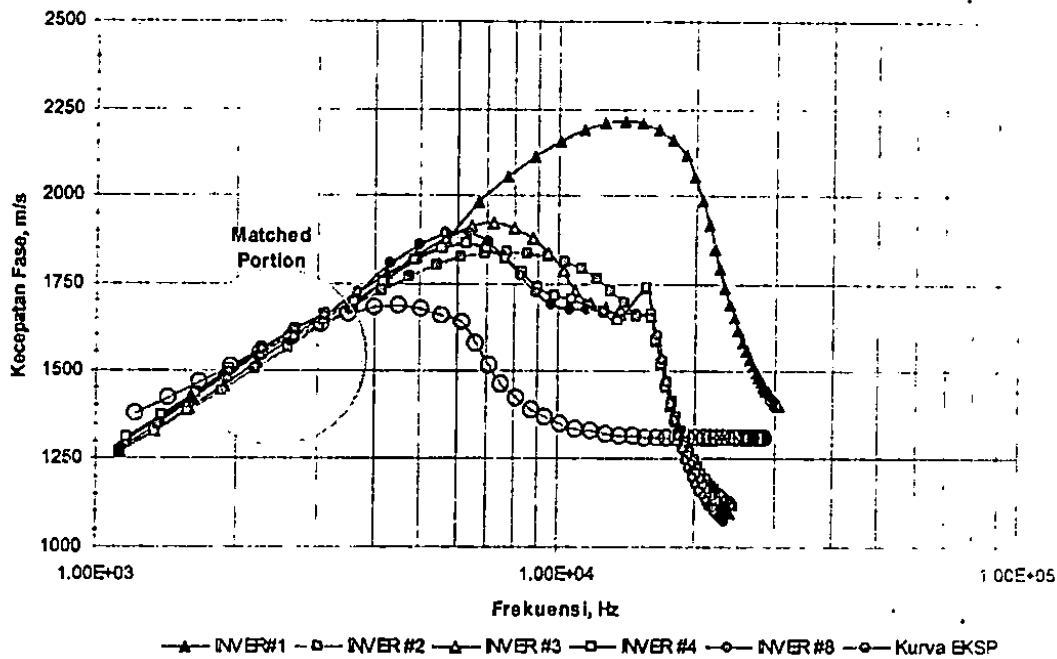


Gambar 5.7 Profil simulasi analisis 2 D untuk sistem 1 dengan parameter inversi V_s

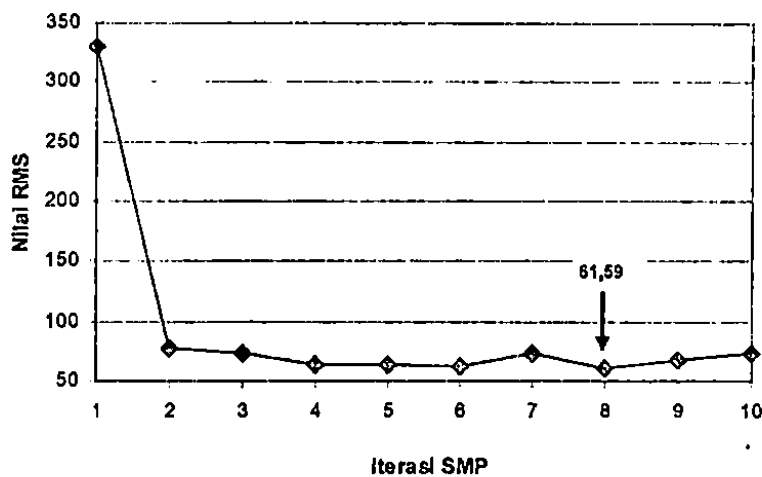
Hasil profil untuk simulasi 2 D diberikan dalam Gambar 5.7. Sebagaimana profil SMP, kesepuluh profil akhir hasil simulasi menunjukkan padanan untuk lapisan pertama profil sedangkan lapisan kedua dan ketiga sangat bervariasi. Meskipun demikian, berdasarkan perbedaan nilai RMS yang besar antara kurva teori dan eksperimen, kesepuluh profil tersebut tidak dapat mewakili profil model yang sebenarnya.

Untuk menyelesaikan pemodelan pada Sistem 1 ini, simulasi selanjutnya dilakukan dengan mengubah dua parameter utama penentu hasil simulasi kurva teoritik kecepatan fase gelombang yaitu parameter kecepatan gelombang geser (V_s) dan parameter ketebalan lapisan profil (H). Gambar 5.8 menjelaskan hasil simulasi model 2 D dengan merubah parameter V_s dan H . Iterasi simulasi dilakukan 10 kali sehingga mendapatkan

nilai RMS yang paling minimum sebesar 61,59 (Gambar 5.9) yang terletak pada iterasi model ke-8.



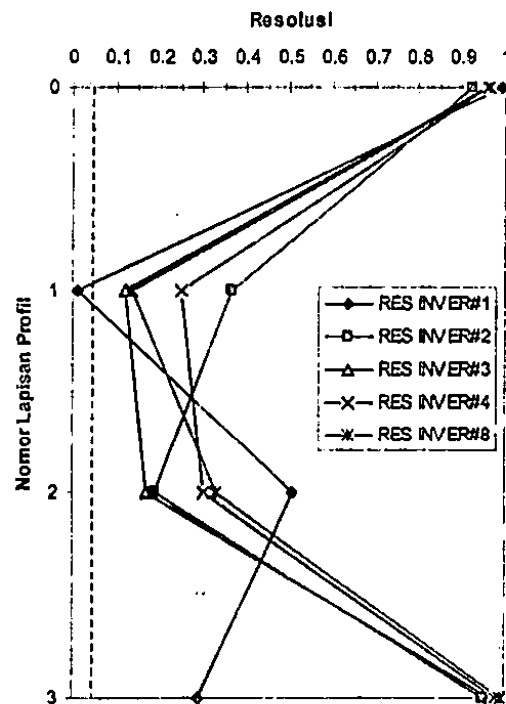
Gambar 5.8 Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 1 dengan parameter inversi V_S



Gambar 5.9 Nilai RMS untuk profil hasil simulasi sistem 1 dengan parameter inversi V_S dan H

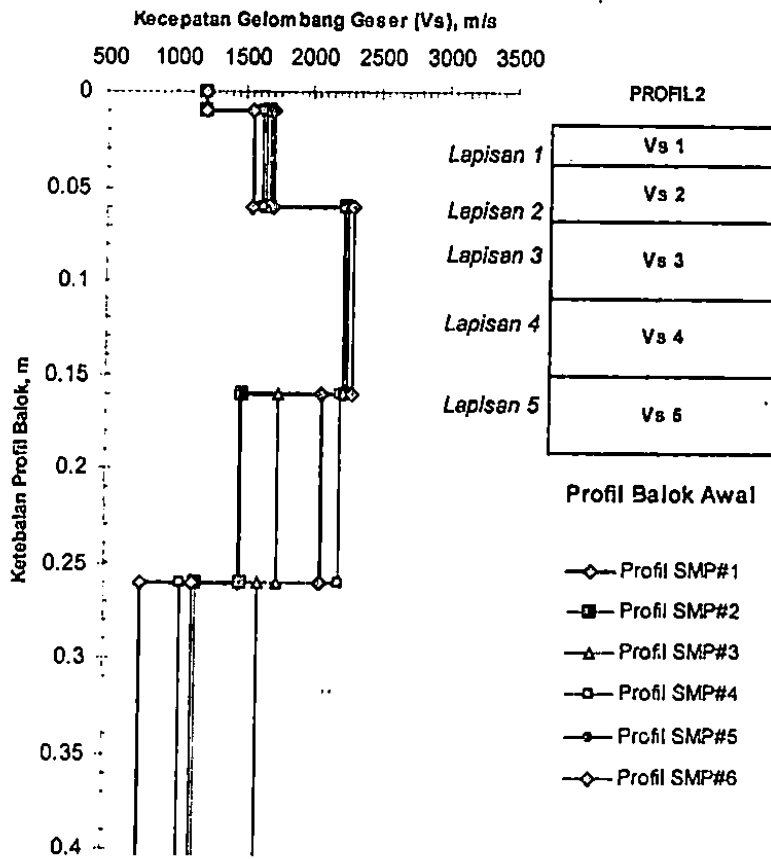
Meskipun memiliki nilai RMS kecil, kurva teori kecepatan fase terlihat hanya berpadanan pada respon frekuensi gelombang antara 1600 hingga 3500 Hz saja yang ditunjukkan dalam tanda lingkaran biru pada Gambar 5.8. Hal ini menunjukkan padanan pada profil kearah sesuai wilayah lapisan terbahas saja yang dalam kasus di sistem 1 ini merupakan

lapisan ketiga dan lapisan tak terhingga. Profil hasil simulasi model 2 D dengan iterasi ke-8 yang ditunjukkan dalam Gambar 5.9, menjadi tidak sesuai karena munculnya sebuah lapisan perlemahan tambahan sebagai lapisan ke-3 dengan ketebalan 0,01 m dan nilai kecepatan gelombang geser 636 m/s. Lapisan ini merupakan lapisan perlemahan yang tipis dan tidak dimungkinkan ada pada profil material model perkerasan. Lapisan ini muncul dimungkinkan karena ketidaksesuaian (*misfitting*) kurva model. Kondisi ketidaksesuaian ini diperkuat dengan analisis resolusi sebagaimana direkomendasikan oleh Rosyidi (2004). Gambar 5.10 menjelaskan hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi model 1. Analisis resolusi ini merupakan analisis kepekaan lapisan yang dalam kajian ini berfungsi untuk mengukur kesesuaian lapisan yang dimunculkan dalam profil permulaan. 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 sejauhmana sensitivitas lapisan terhadap data yang diperoleh. Pembahasan lebih terperinci mengenai analisis resolusi ini dapat merujuk pada Menke (1984), Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Kriteria analisis kepekaan lapisan yang digunakan merujuk kepada nilai sensitivitas lapisan tak terhingga dimana lapisan-lapisan pada profil dapat diterima jika nilai sensitivitasnya lebih besar daripada lapisan tak terhingganya. Dalam Gambar 5.10 menunjukkan bahwa hasil analisis resolusi lapisan pada profil simulasi model 1 untuk iterasi ke-8 yang memperlihatkan lapisan yang kedua dan ketiga memiliki nilai resolusi yang rendah. Hasil ini menunjukkan keterkaitan resolusi sensitivitas model terhadap data adalah rendah. Dengan demikian, profil balok beton model pada sistem 1 dengan tiga lapisan yang dianalisis menggunakan model matrik kekakuan dinamik 2 D ditemukan tidak sesuai dan tidak dapat mewakili kondisi sebenarnya perambatan gelombang Rayleigh pada balok beton. Dengan demikian, profil balok beton model pada sistem 1 dengan tiga lapisan yang dianalisis menggunakan model matrik kekakuan dinamik 2 D ditemukan tidak sesuai dan tidak dapat mewakili kondisi sebenarnya perambatan gelombang Rayleigh pada model perkerasan 1

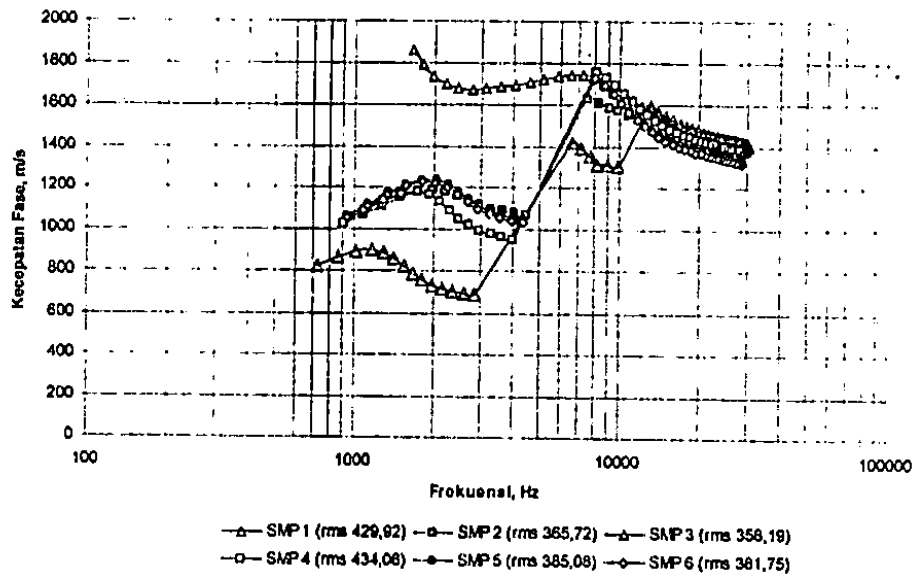


Gambar 5.10 Hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi analisis 2 D model 1

Untuk itu, simulasi model selanjutnya dilakukan dengan kondisi sistem banyak lapisan (*multi-layer*) untuk mendapatkan grid kurva teori yang semakin mendekati kondisi lapangan. Simulasi dilakukan pada profil model sistem ke-2, yaitu profil model perkerasan dengan 5 lapisan penyusun yang diletakkan di atas lapisan tak terhingga. Gambar 5.11 dan Gambar 5.12 menunjukkan profil SMP untuk profil 5 lapisan dan hasil simulasi kurva penyebaran kecepatan fase gelombang teoritik yang diperoleh. Sebagaimana profil model pada sistem 1, kelima hasil iterasi menggunakan variasi rasio λ - H profil SMP kedua ini menunjukkan bahwa secara umum, seluruh profil memiliki trend yang sama kecuali lapisan keempat dan kelima yang sedikit bervariasi. Meskipun demikian profil SMP yang digunakan dalam proses pemodelan dan optimasi adalah profil SMP ke-3. Profil ini dipilih karena memiliki nilai RMS yang terkecil (358,19 m/s) pada kurva simulasi yang dihasilkannya (Gambar 5.12). Dari Gambar 5.12 terlihat juga bahwa kurva teori profil SMP ke-3 ini menunjukkan trend kurva yang berterusan sedangkan profil SMP lainnya terlihat terputus. Hal ini menunjukkan nilai rasio yang digunakan



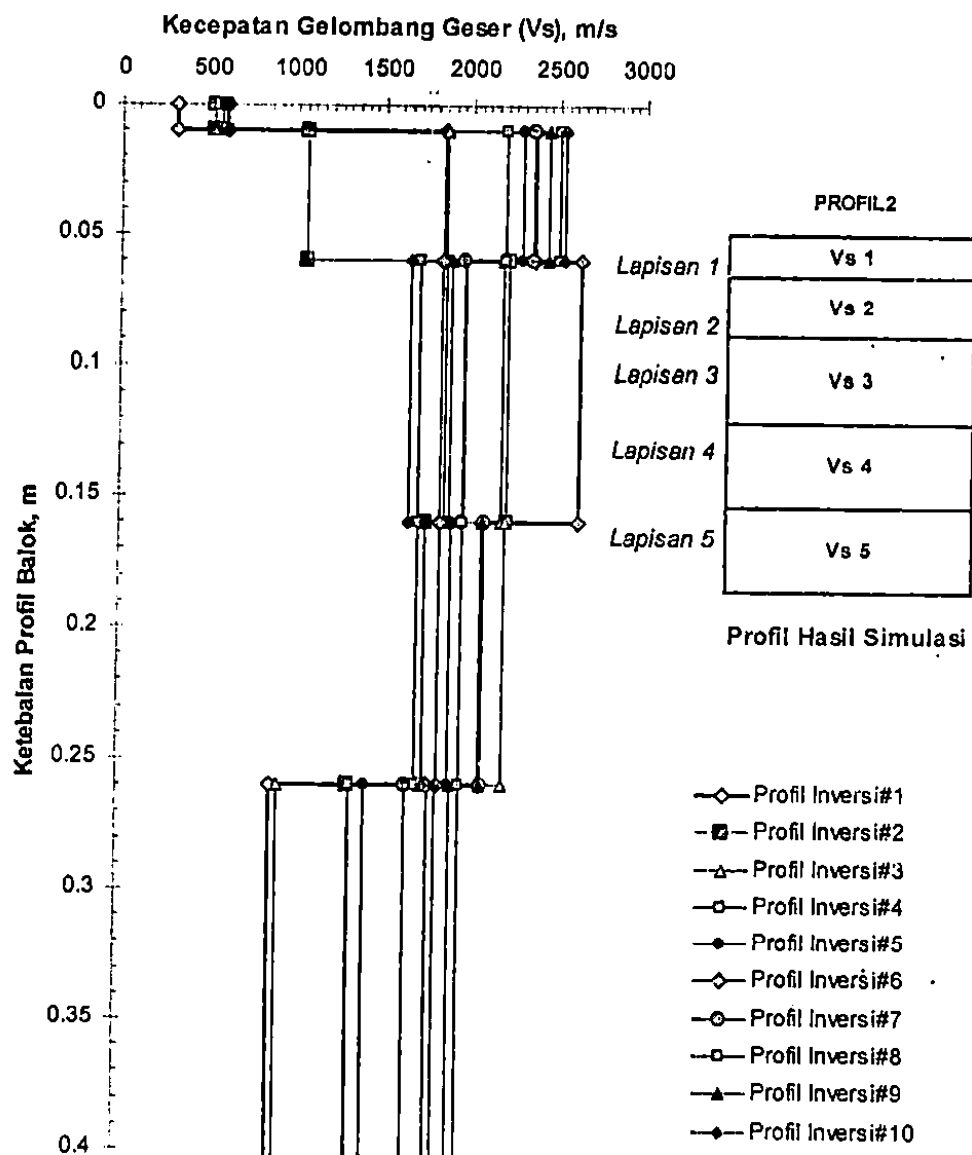
Gambar 5.11 Profil SMP Analisis 2 D untuk Variasi Rasio $\lambda - H$ pada Model 2



Gambar 5.12 Profil SMP 1 hingga SMP 6 untuk Variasi Rasio $\lambda - H$ Model 2

Selanjutnya dilakukan proses simulasi dan optimasi profil SMP terpilih untuk

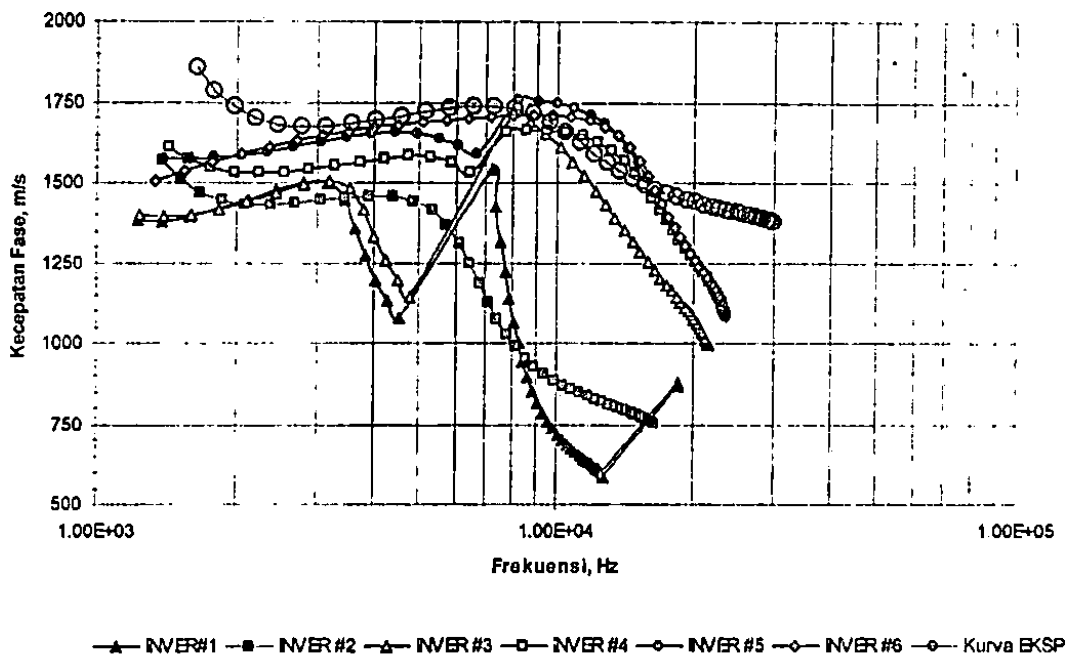
hasil simulasi dan inversi untuk perubahan parameter V_s . Proses iterasi untuk mendapatkan kurva optimum dilakukan sebanyak 10 kali.



Gambar 5.13 Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi V_s

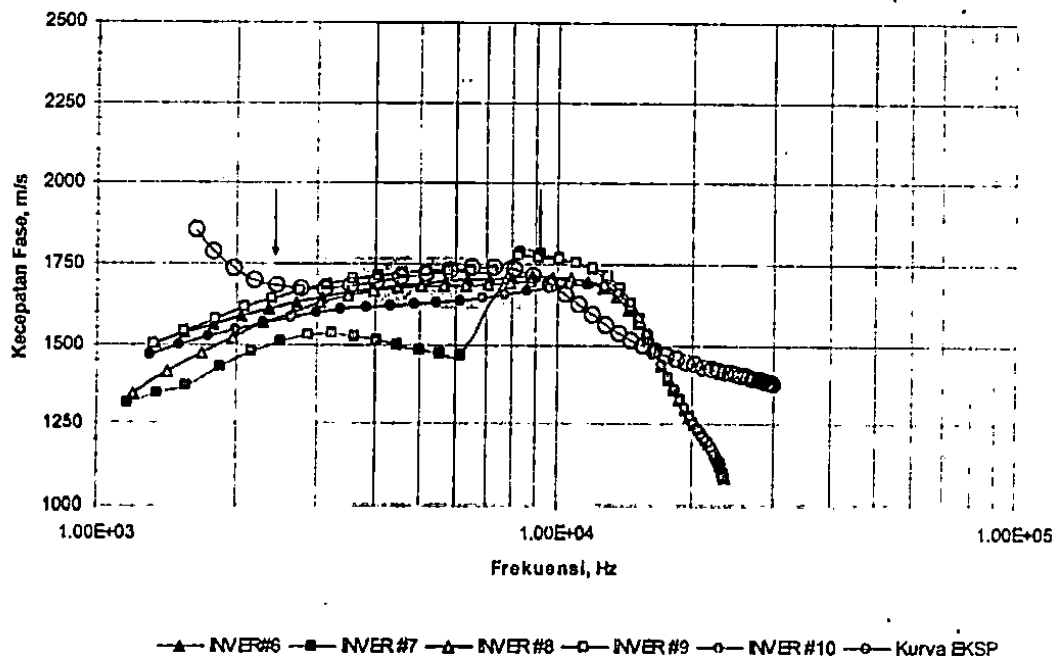
Dari Gambar 5.13 ditunjukkan bahwa kesepuluh profil simulasi menunjukkan nilai V_s lapisan yang sangat bervariasi kecuali pada lapisan pertama yang mana keseluruhan profil menunjukkan nilai V_s yang rendah untuk bahan beton yaitu di bawah 1000 m/s. Hasil ini memperlihatkan adanya lapisan lunak (*weak-layer*) di permukaan model perkerasan.

tidak dapat dideteksi karena kurangnya lapisan model yang diberikan. Gambar 5.14 dan 5.15 menjelaskan kurva model kecepatan fase yang dihasilkan untuk kesepuluh profil inversi dalam Gambar 5.13. Profil yang digunakan sebagai hasil analisis model 2 D adalah profil kesembilan (ke-9) dengan kemiripan model terhadap kurva eksperimen terdekat pada nilai ralat RMS terkecil yaitu 91,04 m/s (Gambar 5.15). Hasil resolusi lapisan dari profil ke-9 menunjukkan nilai yang cukup baik, yaitu di atas nilai 0,1 (Gambar 5.16). Meskipun demikian, apabila dilihat dari persentase bagian kurva model yang sesuai (*fitted*) terhadap kurva eksperimen masih rendah. Kesesuaian kurva model dan eksperimen profil ke-9 terletak hanya pada nilai 2000 – 9000 Hz (Gambar 5.15).



Gambar 5.14 Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi V_s pada Proses Inversi ke-1 hingga ke-6

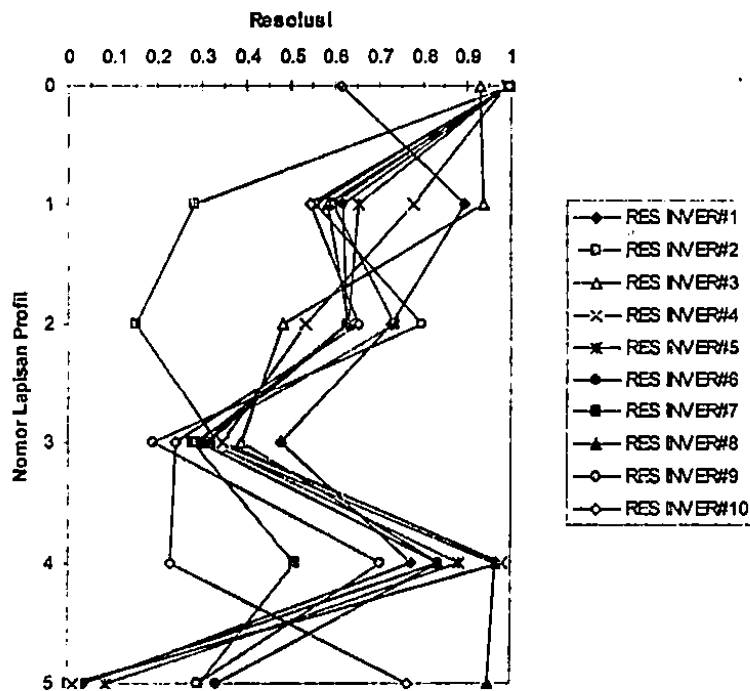
Untuk mendapatkan kesesuaian yang lebih baik di antara perlu dilakukan pengembangan sistem dengan menambah lapisan-lapisan baru dalam profil model 2 D. Perbincangan pengembangan model 2 D menggunakan sistem ke-3 diberikan pada Bagian 5.2.4 dalam bab ini dengan membandingkan hasilnya terhadap analisis model 2 D.



Gambar 5.15 Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi V_s pada Proses Inversi ke-6 hingga ke-10

1.2 Simulasi Model 3 D Konstruksi Balok

Dalam simulasi model 3 D, tidak digunakan profil model pertama dikarenakan nilai lapisan yang sangat terbatas dan telah dibuktikan dalam analisis model 2 D bahwa profil model pertama kurang menunjukkan kesesuaian kurva teori disebabkan terbatasnya lapisan model (Gambar 5.7). Dengan demikian simulasi model 3 D hanya dilakukan

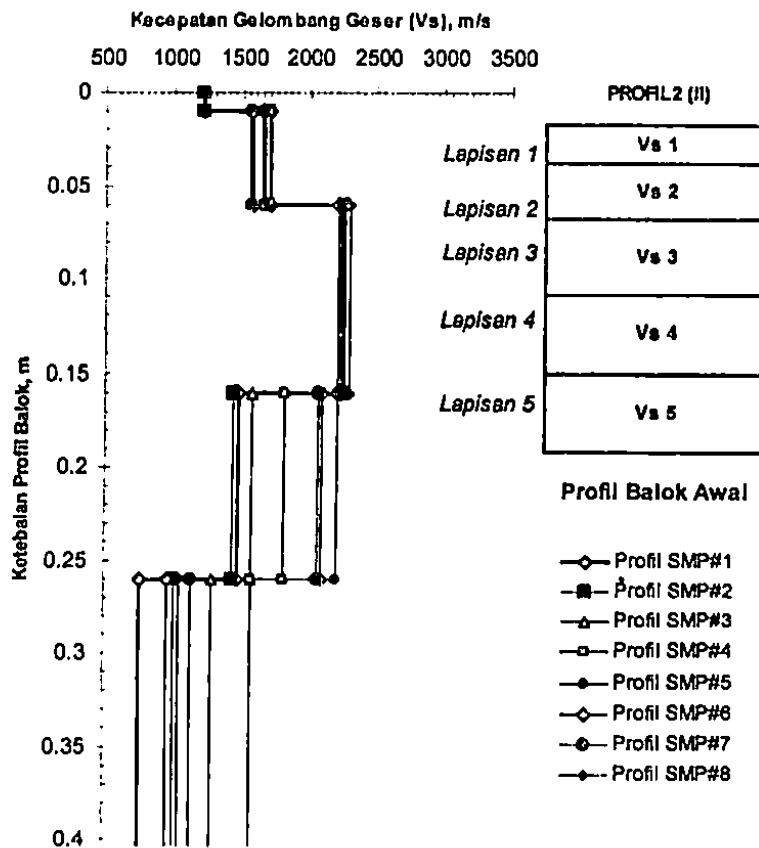


Gambar 5.16 Hasil Analisis Resolusi untuk Profil Akhir Hasil Simulasi 2 D Model 2

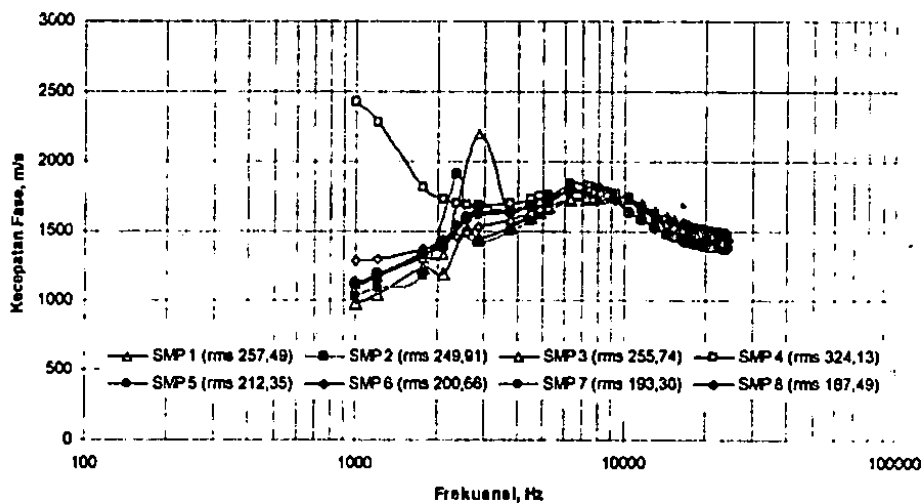
Sebagaimana analisis model 2 D, analisis model 3 D perlu menetapkan terlebih dahulu profil SMP yang akan digunakan dalam analisis inversi. Menggunakan persamaan diskrit 3 D sebagaimana dijelaskan dalam Persamaan 2.70, dilakukan proses pembangunan profil SMP sebagaimana hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 5.17. Kurva dispersi kecepatan fase dari profil SMP diberikan dalam Gambar 5.18. Profil SMP yang dipilih untuk digunakan dalam proses optimasi pembangunan model 3 D dan simulasi kemiripan terhadap kurva eksperimen adalah profil SMP ke-8 dengan nilai kesalahan RMS sebesar 187,49. Kondisi ini terjadi pada rasio $\lambda - H$ pada 0,65. Dari Gambar 5.18 juga dapat dijelaskan bahwa keseluruhan kurva dispersi teori profil SMP yang dianalisis menggunakan model 3 D menunjukkan kemiripan yang baik terutama pada frekuensi di atas 5000 Hz.

Selanjutnya proses inversi dan optimasi dilakukan untuk mendapatkan profil teori 3 D yang baik. Iterasi dengan parameter peubah pada V_s saja dilakukan sebanyak 8 kali dan hasil profil simulasi diberikan dalam Gambar 5.19. Dari Gambar 5.19 dapat dijelaskan bahwa keseluruhan profil cepat hamparan untuk lapisan pertama yang menunjukkan

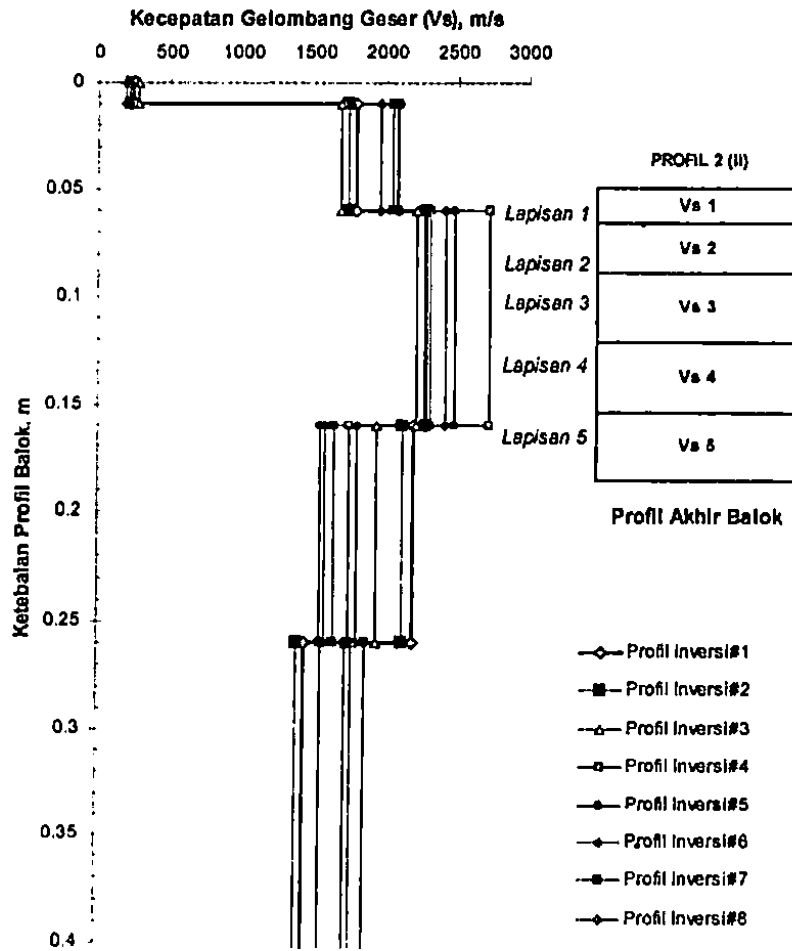
lapisan pelemahan pada profil model perkerasan dengan nilai Vs berkisar antara 200 hingga 300 m/s dengan ketebalan lapisan pelemahan sekitar 0,01 m (1 cm).



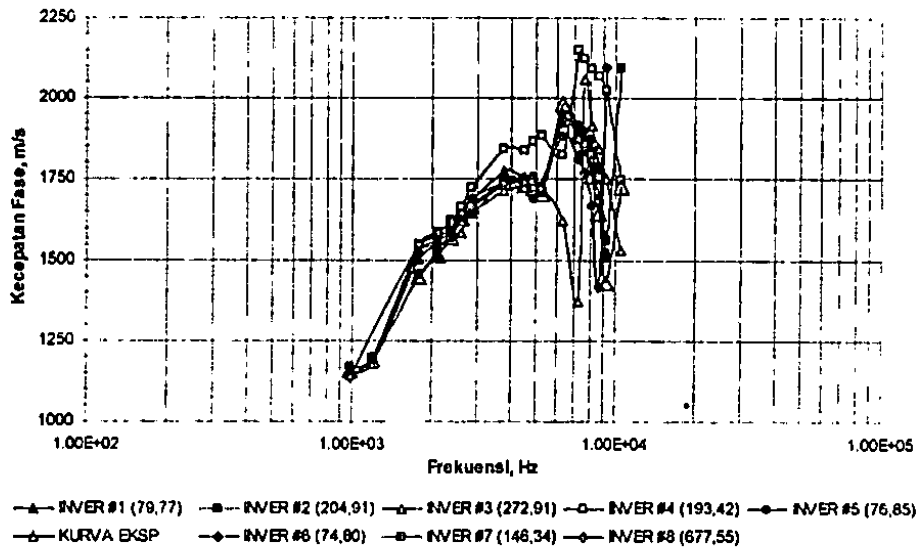
Gambar 5.17 Profil SMP Analisis 3 D untuk Variasi Rasio $\lambda - H$ pada Model 2



Gambar 5.18 Profil SMP 1 Hingga SMP 8 Variasi Rasio $\lambda - H$ pada Model 2

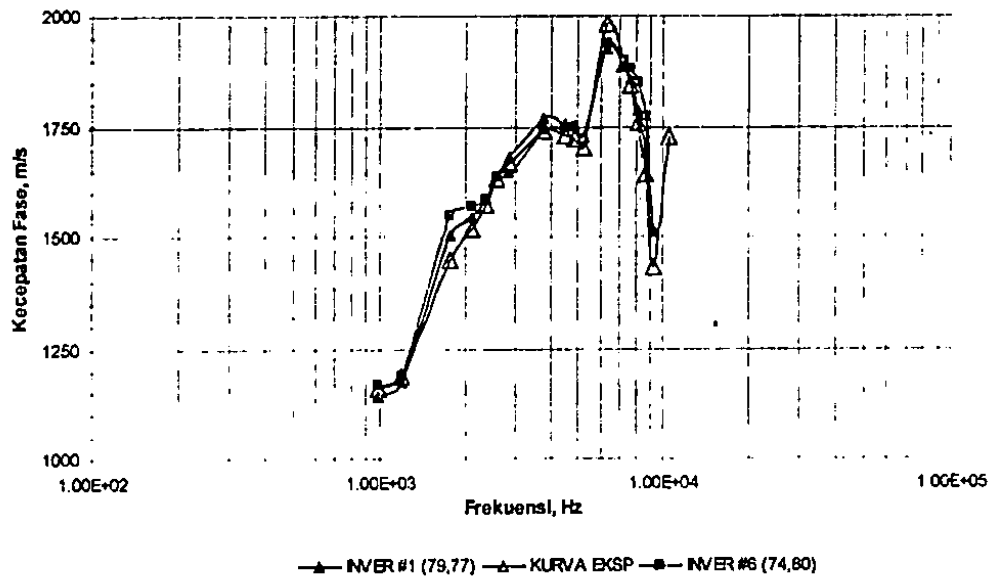


Gambar 5.19 Profil Hasil Simulasi Untuk Analisis 3 D Sistem 2 dengan Parameter V_s



Gambar 5.20 Profil Hasil Simulasi Untuk Analisis 3 D Sistem 2 dengan

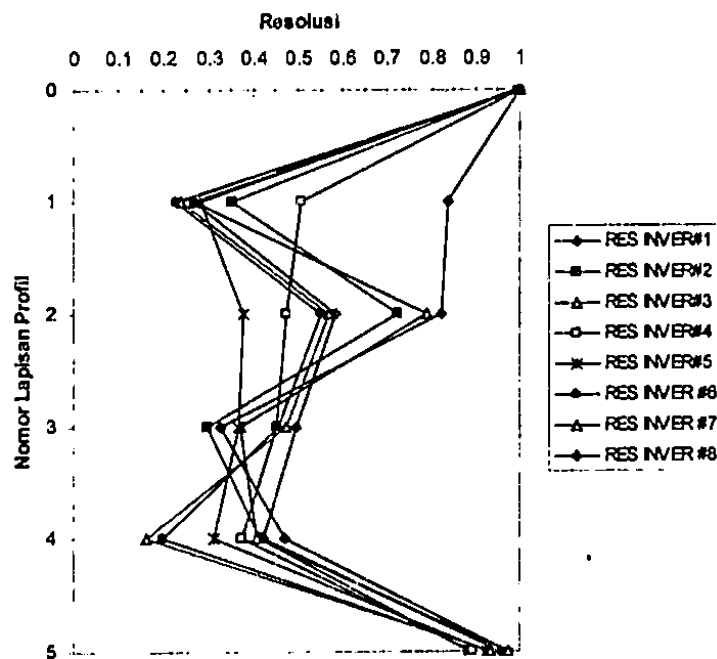
Adanya kondisi lapisan pelemahan pada profilbalok ini hampir sama dengan hasil yang ditunjukkan oleh analisis 2 D (Gambar 5.13). Sementara itu, profil simulasi 3 D untuk lapisan 2 hingga 5 menunjukkan nilai kecepatan geser gelombang yang cukup bervariasi. Profil simulasi 3 D terbaik dipilih untuk nilai kesesuaian kurva teori dan eksperimen yang paling sesuai yang mana diberikan oleh profil model inversi ke-6 dengan nilai ralat RMS sebesar 74,80 m/s (Gambar 5.20). Detail kesesuaian antara kurva teori dan eksperimen model 3 D untuk profil ke-6 ditunjukkan dalam Gambar 5.21.. Dalam Gambar 5.21 juga dijelaskan perbedaan yang sangat kecil diantara kurva teori profil ke-1 dan profil ke-6 terhadap kurva eksperimen. Hal ini menunjukkan suatu kemudahan model 3 D untuk melakukan iterasi kesesuaian terhadap kurva eksperimen dibandingkan dengan model 2 D, walaupun demikian pemrograman komputer 3 D memerlukan waktu yang lebih lama.



Gambar 5.21 Detail Kesesuaian Kurva Teori Simulasi 3 D Profil ke-1 dan ke-6 terhadap Kurva Eksperimen Rosyidi et al. (2005)

Kondisi kesesuaian profil model 3 D di atas dapat dicermati juga dalam hasil analisis resolusi antar lapisan yang dilakukan. Gambar 5.22 menunjukkan hasil analisis resolusi lapisan pada profil hasil simulasi 3 D. Keseluruhan profil menunjukkan nilai resolusi yang baik di atas nilai 0,1. Meskipun demikian, pada profil pilihan ke-6 perlu diperhatikan resolusi lapisan ke-2 dan ke-5 yang menunjukkan adanya nilai resolusi rendah (0,21 dan 0,19) dibandingkan nilai resolusi lapisan lainnya. Hal ini dapat di atasi

antara kurva model terhadap eksperimen, atau dapat dilakukan proses inversi lanjut dengan parameter peubah kecepatan gelombang geser (V_s) dan kedalaman (H). Sistem model perkerasan 1 dan 2 yang diberikan menunjukkan bahwa model 3 D lebih baik dalam hal resolusi dan peminimuman kesalahan RMS. Namun, profil model tersebut menggunakan anggapan bahwa seluruh profil adalah lapisan perkerasan aspal sehingga menggunakan parameter kecepatan geser yang tinggi. Untuk menguji kembali kejituan model 2 D dan 3 D yang digunakan dalam penelitian ini, analisis selanjutnya dilakukan untuk sistem profil model homogen berkecepatan fase rendah diberikan pada bagian 2 di bawah ini.



Gambar 5.22 Hasil Analisis Resolusi untuk Profil Akhir Hasil Simulasi 3 D Model 2

2. Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen dengan Kecepatan Geser Rendah

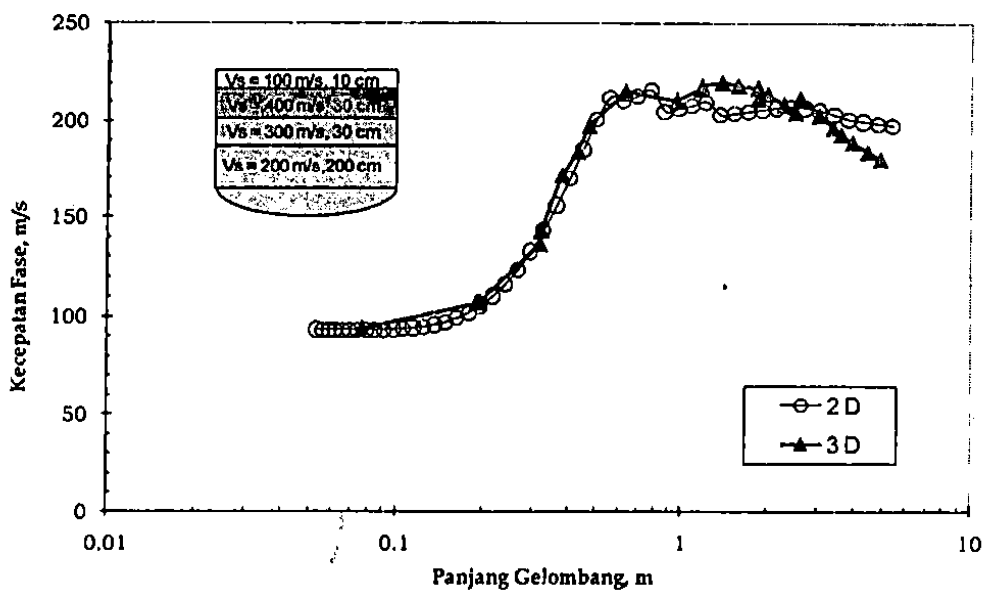
Simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan pada model buatan (simulasi) atau disebut sebagai model artificial dengan lapisan homogen atau memiliki sifat kekakuan bahan yang sama dan reguler serta berkecepatan geser rendah (menandakan sifat kekakuan bahan yang

lapisan fondasi dipadatkan dan lapisan tanah. Karakteristik dinamik model sistem 3 ini diberikan dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Karakteristik lapisan pada sistem 3

No Lapisan	Ketebalan m	V_P m/s	V_S m/s	γ kg/m ³	ν ---	D ---
1	0.05	198.524	100	2320	0.33	0.02
2	0.05	198.524	100	2000	0.33	0.02
3	0.3	794.096	400	2000	0.33	0.02
4	0.3	595.572	300	1900	0.33	0.02
5	0.5	397.048	200	1900	0.33	0.02
6	0.5	397.048	200	1900	0.33	0.02
7	1	397.048	200	1900	0.33	0.02
Half-space	200	397.048	200	1900	0.33	0.02

Hasil simulasi profil model sistem 3 menggunakan matrik kekakuan dinamik 2 D dan 3 D diberikan dalam Gambar 5.23 di bawah ini. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa kurva dispersi teoritik kecepatan fase model 2 D dan 3 D terlihat sangat padan dan cenderung hampir sama. Perbedaan hanya terlihat minimal saja yaitu pada kurva dengan panjang gelombang di atas 2 meter.



Gambar 5.23. Perbandingan hasil simulasi 2 D dan 3 D untuk profil model sistem 3

Trend kurva yang relatif sama ini menunjukkan bahwa pada profil sistem dengan kekakuan setiap lapisan rendah dan perbedaan antar lapisan tidak terlalu ekstrim, model 2

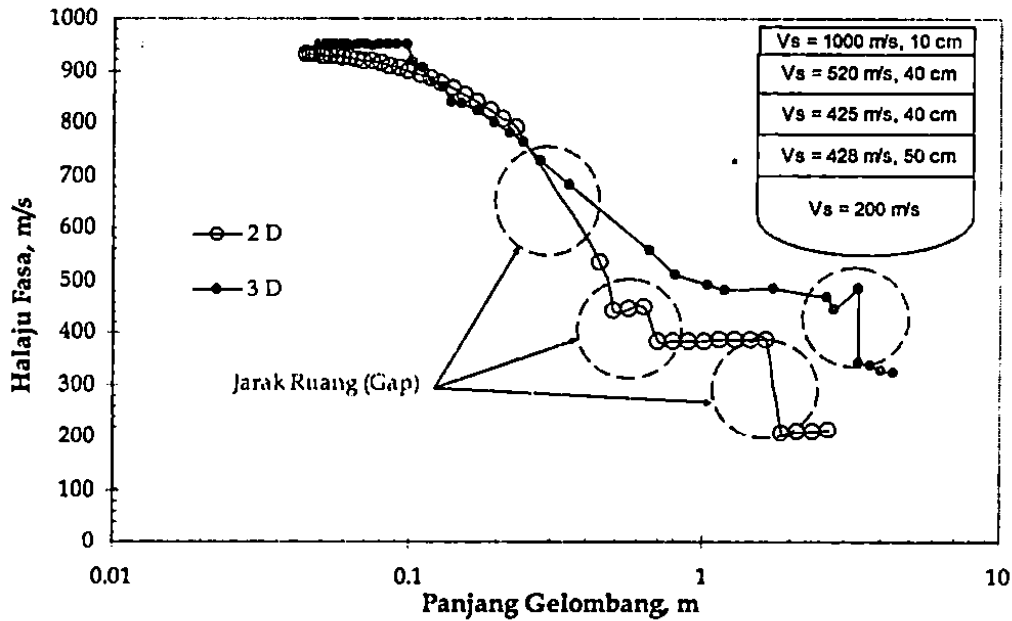
D menghasilkan kurva dispersi yang sepadan dengan model 3 D. Kondisi ini disebabkan oleh tidak adanya perilaku gelombang pantulan yang dimodelkan dalam simulasi. Jika perbedaan antar lapisan terlalu ekstrem, maka perilaku pemantulan (refleksi) dan pembiasan (refraksi) gelombang menjadi hal yang dominan dan perlu perhatian.

3. Model Artifisial Tidak Reguler (Teratur) dan Heterogen

Dalam bagian ini, kajian numerik dilakukan ke atas profil buatan yang tidak teratur (*irregular*) yang dianggap sebagai profil perkerasan jalan sederhana, dalam kasus ini disebut sebagai sistem 4. Secara umum, profil jalan terbagi atas 3 susunan, yaitu (1) sistem lapisan permukaan yang biasanya merupakan lapisan terkaku yang terbuat dari campuran perkerasan aspal atau beton, (2) sistem lapisan fondasi yang terdiri dari campuran agregat dan sedikit tanah, biasanya telah mengalami pemadatan berat sehingga memiliki nilai kekakuan di atas lapisan tanah, dan (3) sistem lapisan tanah dasar baik yang telah dipadatkan (*compacted subgrade*) maupun yang masih tanah asli (*natural subgrade*).

Untuk ketiga susunan lapisan tersebut, lapisan permukaan diperkeras memiliki nilai kekakuan yang paling besar selanjutnya secara berurut-turut tersusun secara reguler semakin rendah adalah lapisan fondasi dan lapisan tanah dasar. Secara umum, profil perkerasan jalan dapat dikatakan memiliki sistem banyak lapisan dengan lapisan keras diletakkan di atas lapisan lunak. Untuk mengkaji pendekatan perambatan gelombang R yang bergerak pada profil perkerasan jalan, dilakukan simulasi kurva dispersi teori model 2 D dan 3 D.

Untuk melakukan simulasi kurva dispersi teori model 2 D dan 3 D dilakukan pemodelan kedepan (*forward modeling*) terhadap model buatan perkerasan jalan yang telah ditentukan. Profil model parameter permulaan, SMP, dituliskan terlebih dahulu dalam program komputer selanjutnya dilakukan proses pemodelan dengan prinsip perhitungan balik (*backcalculation*) untuk memperoleh simulasi simpangan gelombang dalam bilangan Real dan Imajiner berdomain spasial. Melalui penentuan nilai sudut fasenya, kurva dispersi kecepatan fase selanjutnya dapat dihasilkan.



Gambar 5.24 Kurva dispersi teori 2 D dan 3 D untuk profil artifisial sistem 4

Gambar 5.24 memberikan hasil analisis penyelesaian kurva dispersi teori 2 D dan 3 D. Untuk kasus ini, kedua model tidak menunjukkan perpadanan garis grafik yang baik. Hasil yang mendekati kesamaan dapat dilihat pada kurva untuk panjang gelombang dari 0.05 hingga 0.08 m dan 0.1 hingga 0.22 m. Perbedaan yang jelas adalah panjang gelombang antara 0.22 hingga 3 m. Selain itu dapat dilihat pada kurva 3 D bahwa pola sebaran titik kecepatan fase adalah lebih berterusan/seragam, walaupun pada panjang gelombang 3 hingga 4 m terdapat jarak ruang (gap). Hal ini berbeda dengan lengkung 2 D yang menghasilkan jarak ruang (gap) yang lebih banyak. Ini berlaku pada peralihan antara kelompok data yang menunjukkan sifat dua lapisan yang bersebelahan/bertemu (ditunjukkan oleh lingkaran merah). Jarak ruang ini menjadi kelemahan model 2 D untuk mendapatkan hasil simulasi pada kawasan peralihan antara 2 lapisan yang memiliki kecepatan fase yang ekstrim berbeda. Perbedaan analisis 2 D dan 3 D seperti di atas akan mempengaruhi kepada hasil akhir profil buatan yang dibangun seterusnya.

Menggunakan data kurva dispersi kecepatan fase dilakukan inversi sederhana (*simple inversion*) yang direkomendasikan oleh Richarts et al. (1970), kepada kedua model tersebut (2 D dan 3 D). Hasil inversi sederhana tersebut selanjutnya didiskritkan (Gambar 5.25) untuk memudahkan ilustrasi perbandingan. Perbedaan panjang gelombang dan kecepatan fase pada kedua model kurva dispersi teori yang jelas ditunjukkan dalam

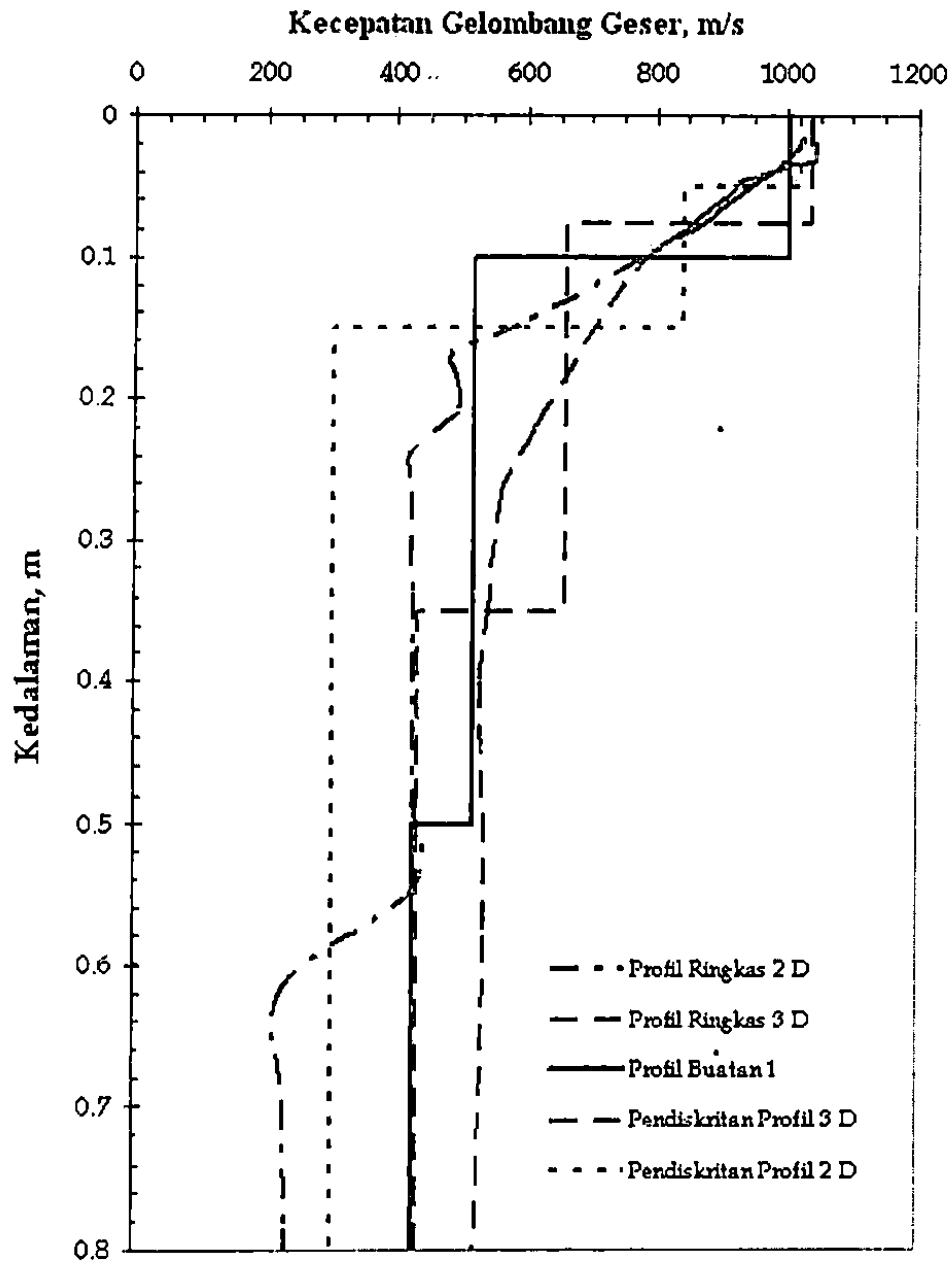
Gambar 5.24, menyebabkan perbedaan yang jelas pula pada profil akhir daripada analisis simulasi. Kedua-dua profil adalah sama sehingga kedalaman 0.1 m yang merupakan nilai kecepatan lapisan perkerasan aspal. Meskipun demikian, setelah kedalaman 0,1 m, profil terlihat sangat berbeda. Terutama pada profil hasil simulasi 2 D, perbedaan terlihat pada pendeteksian lapisan antara fondasi dan permukaan aspal. Bahkan, model 2 D tidak mampu mendeteksi perubahan pada lapisan fondasi ke lapisan tanah dasar profil perkerasan jalan model. Dalam kasus ini, profil 3 D yang dihasilkan lebih menunjukkan padanan yang baik bagi profil buatan berbanding profil 2 D.

Simulasi selanjutnya dilakukan pada model sistem 5 yang terdiri dari 3 lapisan yang lebih sederhana dari sistem 4. Karakteristik dinamik sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 5.4 dan Gambar 5.26.

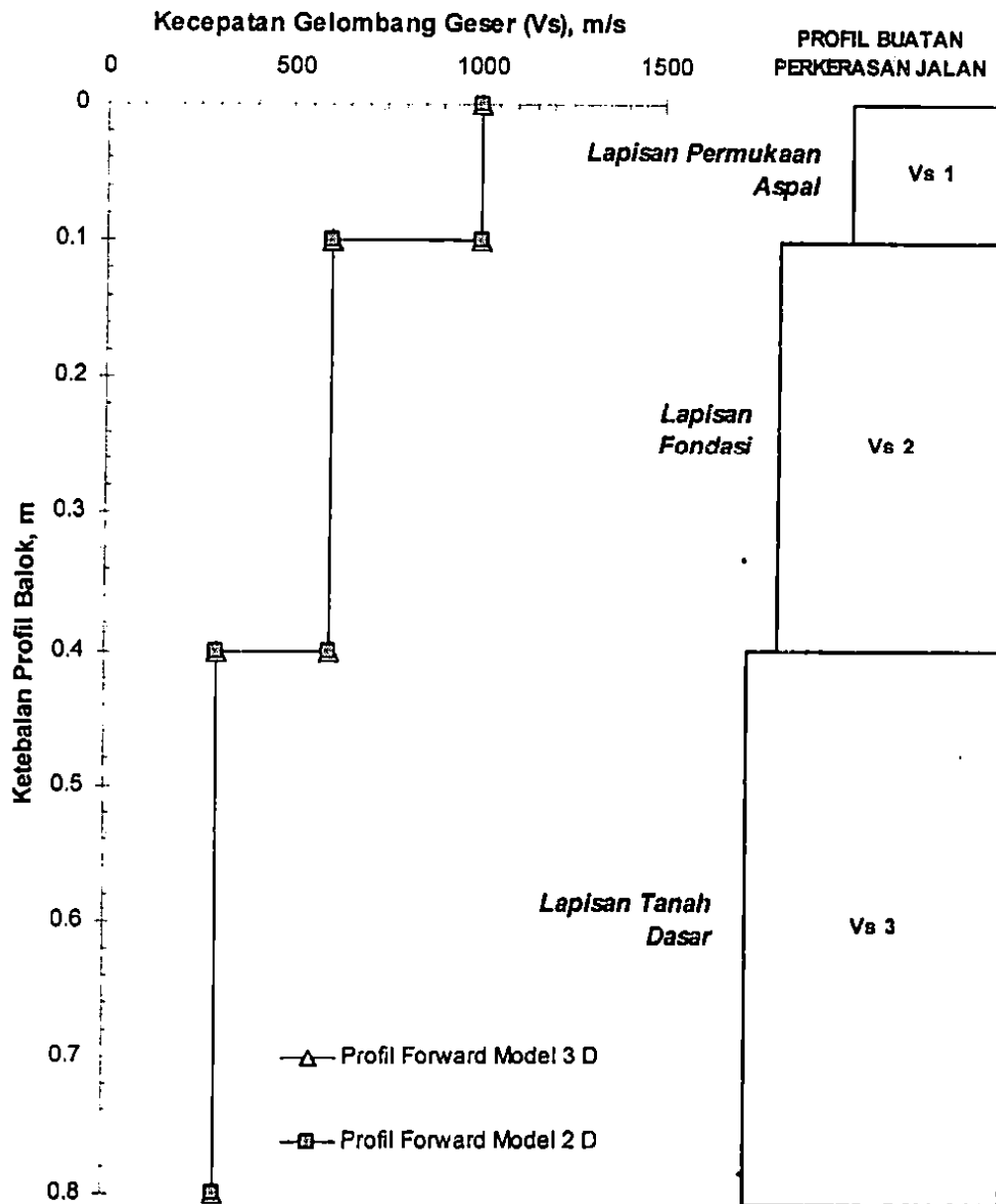
Tabel 5.4 Karakteristik Dinamik Lapisan Sistem Profil Jalan Model Buatan

No Lapisan	Ketebalan m	V_p m/s	V_s m/s	γ kg/m ³	ν ---	D ---
1	0,1	1985.24	1000	2200	0,33	0,02
2	0,3	1191.144	600	2000	0,33	0,02
3	0,4	595.572	300	1900	0,33	0,02

Hasil simulasi menunjukkan kedua kurva model memberikan trend yang sama sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5.27. Frekuensi tinggi pada kedua kurva model menunjukkan pendeteksian terhadap lapisan permukaan aspal yang dibuktikan dengan nilai kecepatan fase yang tinggi (di atas 700 m/s) yang selanjutnya semakin rendah frekuensi respon gelombang, maka nilai kecepatan fasenya menjadi menurun yang merujuk pada kondisi sistem lapisan yang mendeteksi lapisan fondasi dan tanah dasar

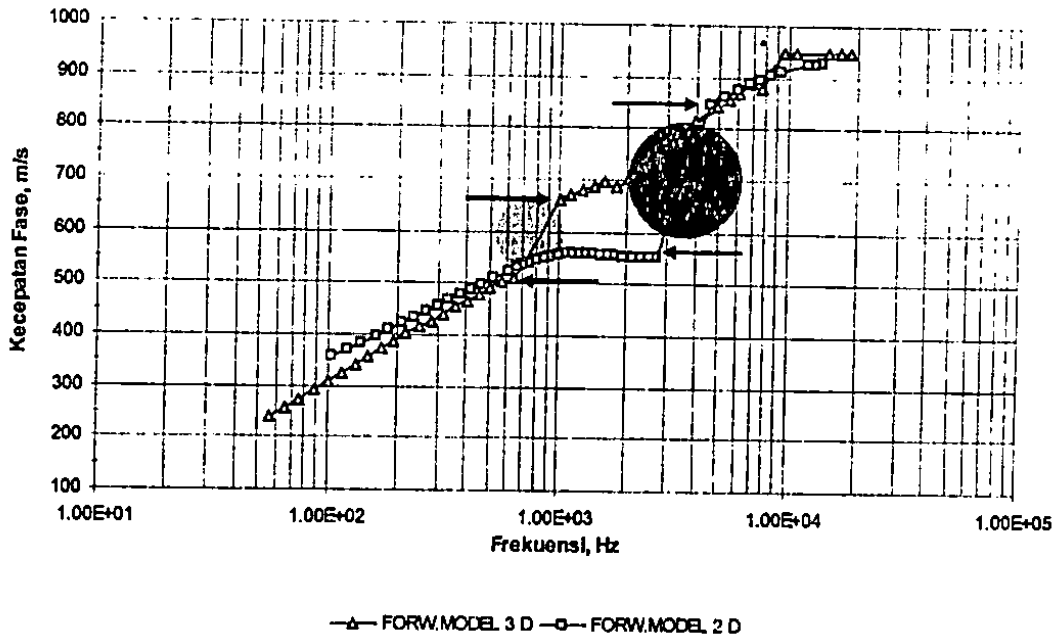


Gambar 5.25 Perbandingan profil pendiskritan dan hasil inversi sederhana pada



Gambar 5.26 Sistem Profil Model Sistem 5 untuk Proses Simulasi 2 D dan 3 D pada Model Buatan Perkerasan Jalan

Meskipun demikian, terlihat fenomena distribusi data fase pada model 2 D. Perubahan yang mencolok pada profil model dari lapisan pertama ($V_s = 1000$ m/s) menuju lapisan kedua ($V_s = 600$ m/s), ditampilkan dalam kurva 2 D sebagai loncatan data yang besar (ditunjukkan dalam tanda panah dan lingkaran biru), sedangkan pada kurva hasil model 3 D terdapat juga loncatan data namun relatif tidak terlalu besar (ditunjukkan dalam tanda panah dan lingkaran kuning). Selain itu, dalam model 3 D, kurva dispersi model yang dihasilkan memberikan tampilan yang lebih berterusan (continuous).



Gambar 5.27 Hasil simulasi kurva dispersi model 2 d dan 3 d pada model buatan

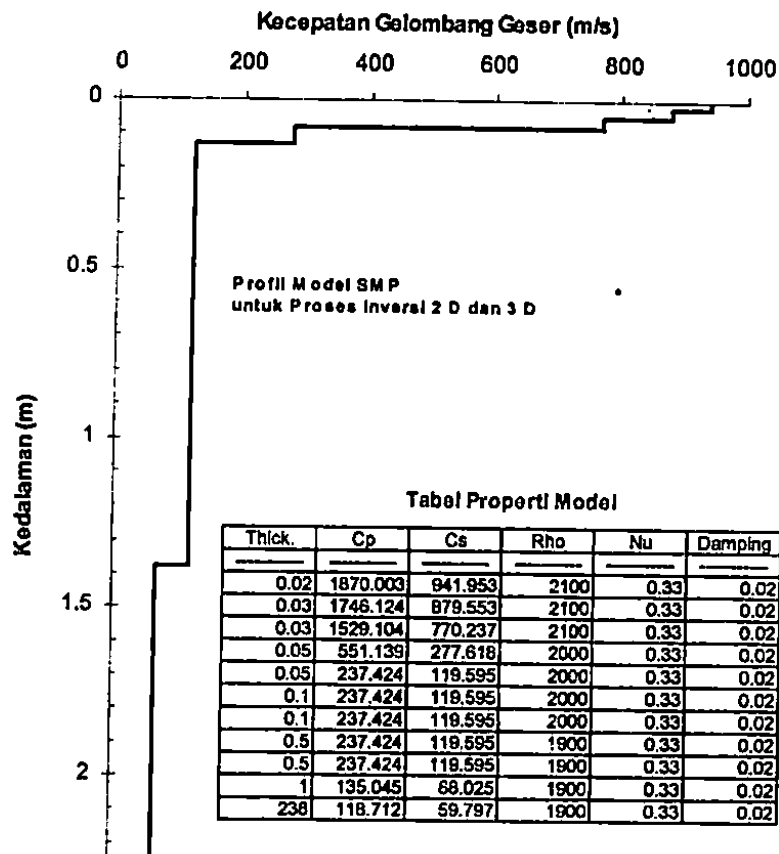
Hasil simulasi di atas menunjukkan bahwa kedua model 2 D dan 3 D memiliki potensi untuk digunakan dalam analisis perambatan gelombang R pada profil perkerasan jalan. Untuk menguji rasionalisasi kedua model dilakukan perbandingan simulasi model terhadap kurva dispersi eksperimen lapangan yang diperoleh dari Widodo dan Rosyidi (2007).

4. Simulasi Model 2 D dan 3 D terhadap Data Kurva Dispersi Lapangan

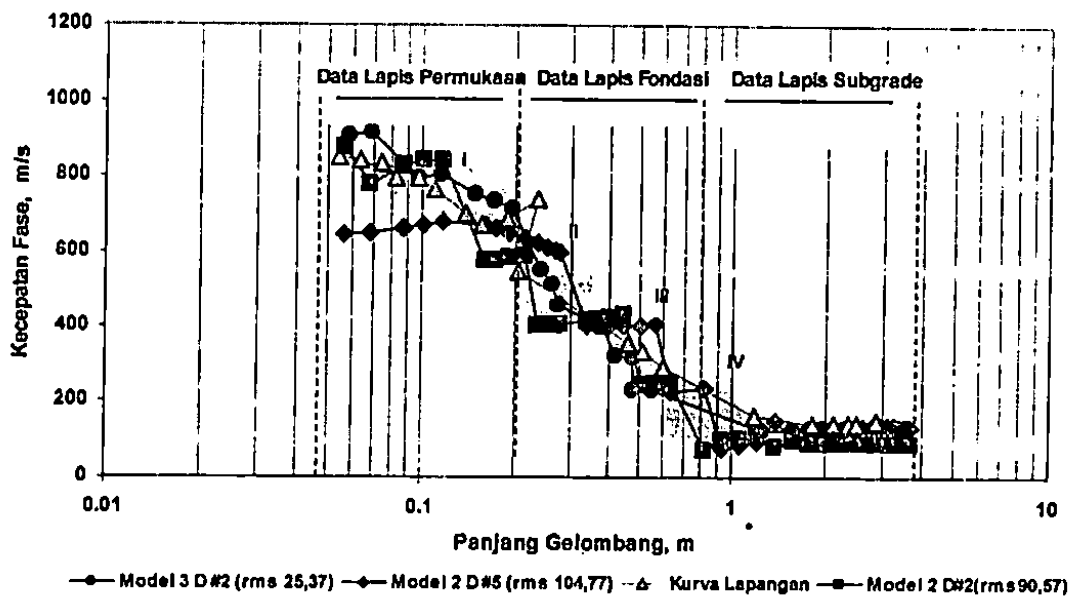
Widodo dan Rosyidi (2007) telah mengambil beberapa data lapangan seismik pada beberapa lokasi di Jalan Propinsi Prambanan – Pakem, DI. Yogyakarta. Dari hasil kajian mereka, data lapangan telah dianalisis menjadi kurva dispersi kecepatan fase melawan frekuensinya. Pada bagian ini, simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan kepada kurva dispersi hasil penelitian Widodo dan Rosyidi (2007) sebagai validasi dan pengukur perbandingan terhadap kejituan kedua model. Data sekunder kurva dispersi dari Widodo dan Rosyidi (2007) yang digunakan dalam kajian ini diberikan dalam Gambar 5.28. Sebagaimana pada profil model sistem 1 hingga 5 di atas, satu SMP perlu dibangun untuk memulisi proses simulasi. SMP terdiri dari multi-lapisan yang representasi dari susunan profil perkerasan jalan dari lapisan permukaan awal hingga lapisan tanah dasar. Data

banyak lapisan (*multi-layers*) yang disusun terbagi dalam 3 lapisan utama yaitu lapisan permukaan yang disusun atas 3 lapisan, lapisan fondasi atas dan bawah yang masing-masing tersusun dalam 3 lapisan, serta lapisan tanah dasar yang tersusun atas 2 lapisan. Profil SMP yang digunakan dalam analisis ini dijelaskan secara rinci beserta properti dinamik kecepatan gelombang geser dalam Gambar 5.28. Hasil simulasi model diberikan dalam Gambar 5.29.

Dari Gambar 5.29 dapat ditunjukkan bahwa kurva teori 2 D yang dihasilkan terdapat deviasi besar terhadap kurva eksperimen terutama pada sampling untuk lapisan permukaan jalan. Garis kurva kecepatan fase teori 2 D terlihat pada wilayah 630 – 680 m/s sedangkan garis kurva kecepatan fase eksperimen pada 670 – 850 m/s. Kurva 2 D yang dihasilkan juga terlihat terputus-putus pada segmen data lapisan fondasi jalan dan terdapat pengelompokan beberapa segmen kurva data yang seragam misalnya pada panjang gelombang 0,3 hingga 0,6 m. Hal ini dikarenakan algoritma model 2 D tidak mampu secara sempurna mendistribusikan data perambatan gelombang fase pada perpindahan wilayah antar lapisan keras (lapisan permukaan aspal) dan lapisan fondasi. Secara umum, deviasi kurva 2 D terhadap kurva eksperimen terlihat sangat lebar dengan tingkat kesalahan rms yang dihasilkan oleh 5 kali proses iterasi menunjukkan angka ralat RMS 104,77 m/s. Demikian juga dengan kurva kedua hasil pemodelan 2 D dengan nilai ralat RMS 90,57 m/s. Secara umum model 2 D telah mendekati kurva eksperimen dengan memperlihatkan kesesuaian yang baik pada data lapisan subgrade perkerasan jalan dengan nilai ralat yang lebih kecil.

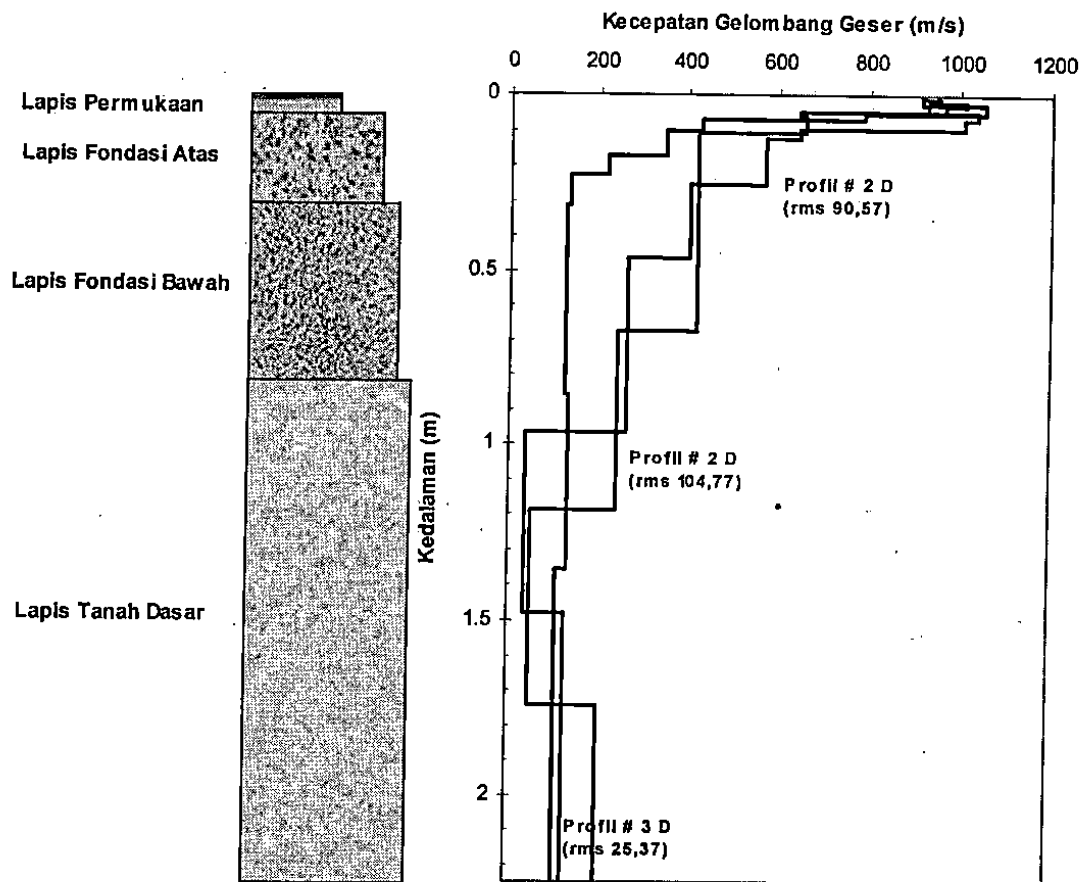


Gambar 5.28 Profil Model SMP untuk Analisis Model 2 D dan 3 D
Untuk profil data Widodo dan Rosyidi (2007)

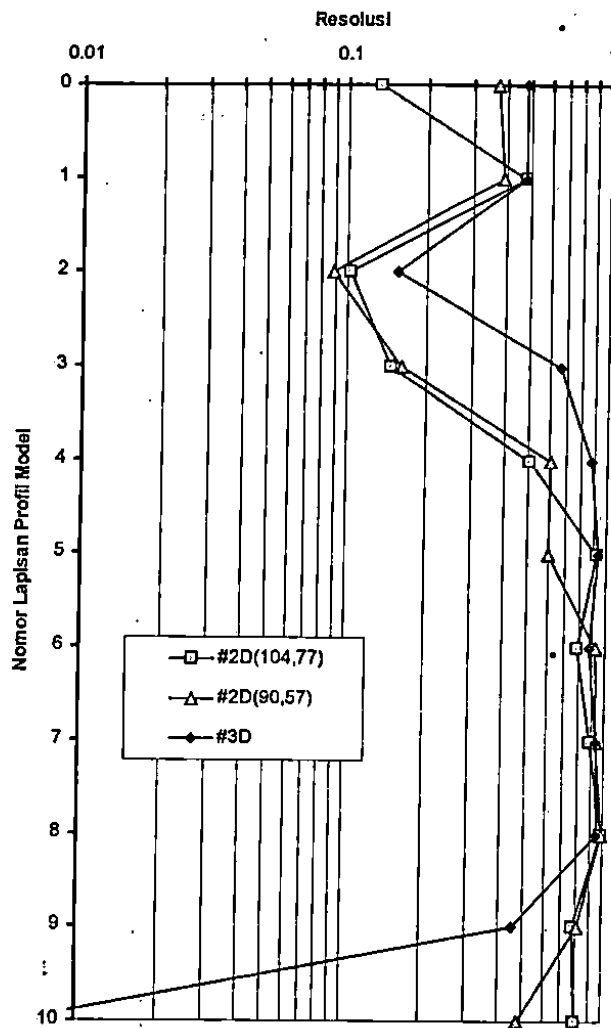


Gambar 5.29 Kurva dispersi hasil simulasi model 2 d dan 3 d terhadap kurva dispersi
akseptasi Jalan Brawahan. Dalam dari Widodo dan Rosyidi (2007)

Proses penyelesaian dalam inversi menggunakan model perambatan gelombang 3 D terhadap kurva eksperimen menghasilkan kurva teori dengan nilai ralat RMS sebesar 25,37 m/s dengan proses iterasi sebanyak 2 kali (Gambar 5.29). Secara umum, kurva model 3 D mampu membentuk trend kurva yang sesuai dengan kurva eksperimen. Walaupun masih terdapat beberapa segmen data model 3 D yang terlihat tidak sesuai terutama pada 0,5 – 1 m. Hal ini dapat diselesaikan dengan proses penyesuaian kurva yang lebih detail yaitu merubah parameter model mula (SMP) dan memperbanyak proses iterasi. Kondisi ini memperlihatkan bahwa model 3 D dapat lebih nyata untuk menggambarkan kurva perambatan gelombang Rayleigh pada profil perkerasan jalan dengan multi-lapisan. Profil hasil simulasi diberikan pada Gambar 5.30. Kedua profil model 2 D dengan ralat RMS masing-masing 90,57 dan 104,77 m/s, menunjukkan ketidaktepatan pada lapisan-lapisan profil yang mewakili lapisan fondasi perkerasan jalan yang diwakili oleh lapisan ke-5 hingga ke-8, dan lapisan ke-9 dan ke-10 yang representasi dari lapisan tanah dasar tampak adanya lapisan pelemahan yang cukup tebal. Ketidaktepatan lapisan di atas dapat dikontrol dengan kewajaran nilai lapisan fondasi yang terlalu tinggi dan perubahan lapisan yang tampak regular, sedangkan kondisi profil sebenarnya perkerasan jalan tersusun dari perubahan kekakuan lapisan yang ekstrem dari lapisan permukaan aspal dan lapisan fondasi. Ketidaktepatan lainnya dilihat dari lapisan pelemahan yang terletak pada lapisan tanah dasar (lapisan ke-9), dengan nilai kecepatan geser 40 m/s menunjukkan hasil yang kurang sesuai (wajar) untuk properti tanah karena nilai kewajaran untuk tanah dasar perkerasan jalan berkisar lebih dari 100 m/s (Rosyidi, 2004). Analisis resolusi lapisan dilakukan terhadap profil model 2 D dan 3 D. Gambar 5.31 menunjukkan bahwa resolusi untuk model 3 D terlihat lebih baik dibandingkan kedua profil model 2 D, kecuali pada lapisan ke-10 dari profil model 3 D yang mana lapisan terakhir (lapisan tak terhingga) memiliki nilai resolusi sangat kecil (di bawah 0,01) dan lapisan ini dapat dihilangkan atau diabaikan.



Gambar 5.30. Perbandingan Profil Model 2 D dan 3 D di Lapis Dasar



Gambar 5.31 Hasil Analisis Resolusi Lapisan Profil Model 2 D dan 3 D di Jalan Prambanan – Pakem

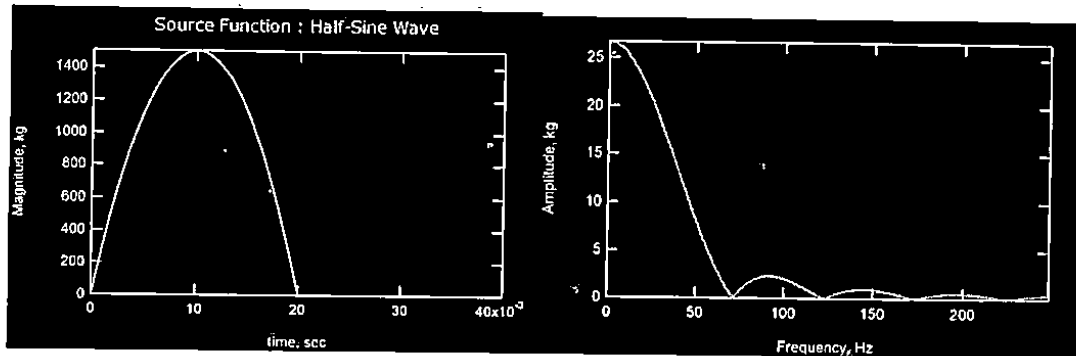
5. Validasi Metode Elemen Hingga (FEM)

Untuk memvalidasi perilaku gelombang permukaan ini, dilakukan simulasi dalam FEM. Kajian FEM ini dibantu oleh Prof.Sung Ho Joh dari Chung Ang University, Korea menggunakan software ABAQUS. Model FEM yang digunakan memiliki karakteristik asimetrik dan parameter sebagai berikut:

- 4-Node Axisymmetric Element
- Element Size : 0.25cm x 0.25cm
- Time interval = 5e-4 sec, Total time = 0.512 sec

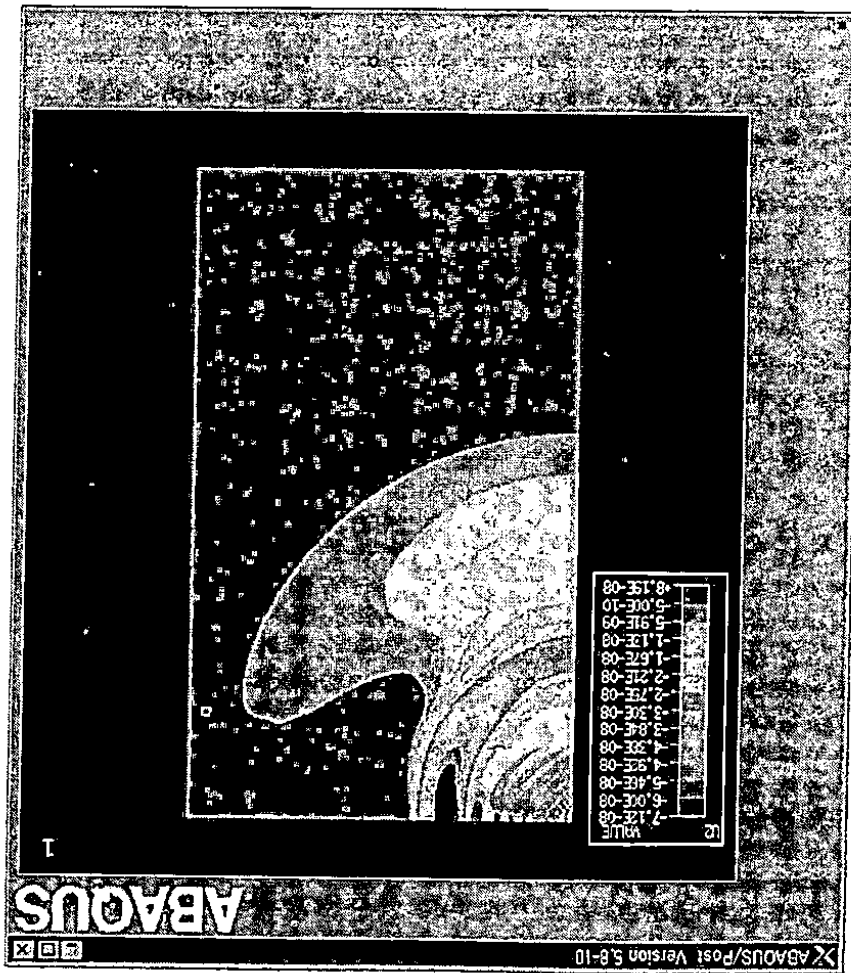
- Infinite Elements Used at Boundaries.
- Soil : $V_s = 300$ m/sec, Poisson's Ratio = 0.333

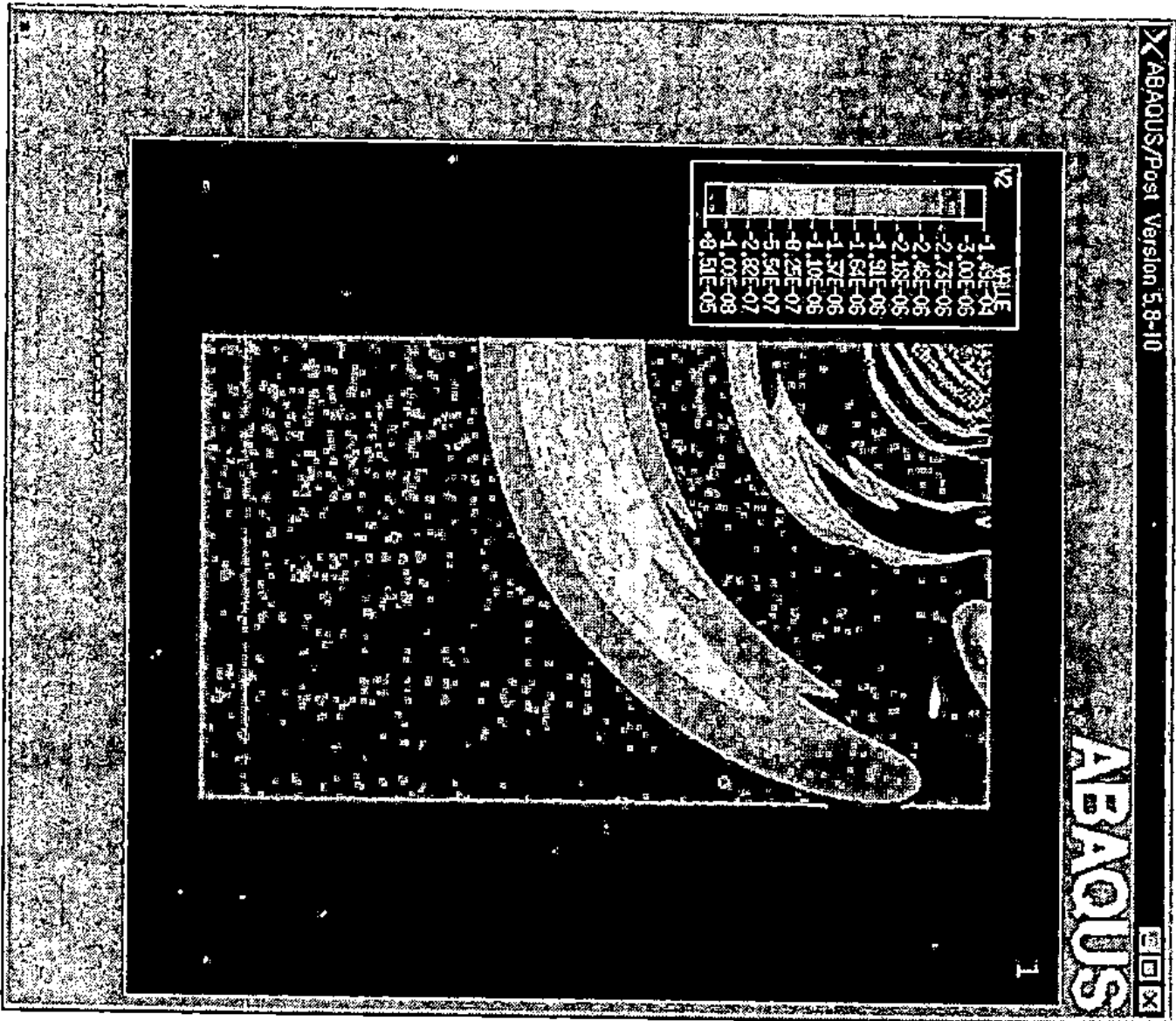
Fungsi sumber gelombang yang diberikan adalah setengah gelombang sinus dengan hasil FFTnya diberikan dalam Gambar 5.32 di bawah ini:



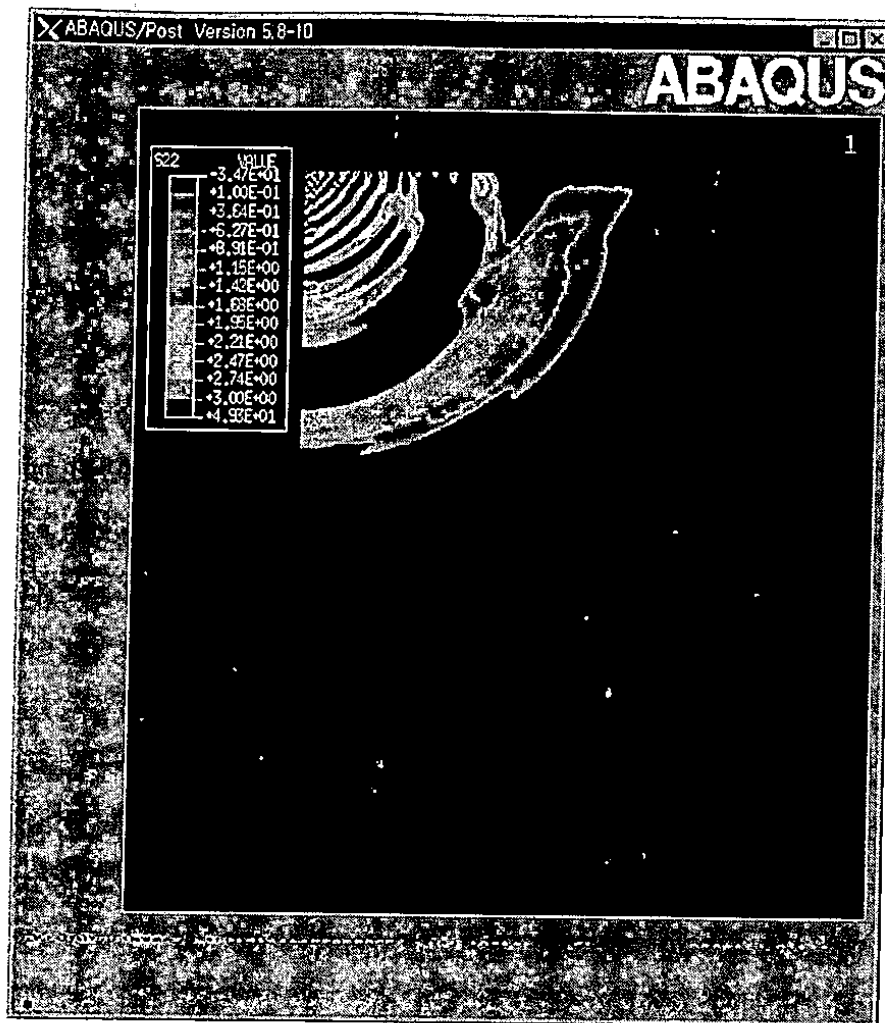
Gambar 5.32 Fungsi sumber gelombang untuk analisis FEM

Visualisasi perambatan gelombang hasil analisis FEM diberikan dalam Gambar 5.33 hingga 5.36. Gambar 5.33 menunjukkan simpangan/perpindahan partikel perambatan gelombang dalam waktu (t_2) 0.05 detik, sedangkan Gambar 5.34 menunjukkan proses perambatan gelombang dalam parameter simulasi kecepatan (*particle velocity*) partikel gelombang. Untuk tegangan normal (normal stress) dan geser (shear stress) yang dihasilkan pada waktu pengamatan 0,05 detik diberikan dalam Gambar 5.35 dan 5.36. Corak gelombang (wave train) untuk parameter ukur dinamik simpangan, kecepatan dan percepatan gelombang seismik pada suatu media solid selanjutnya dihasilkan dari analisis FEM sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.37. Dari data simulasi ukur dinamik tersebut dapat dihasilkan spektrum fase, yang selanjutnya dianalisis guna mendapatkan kurva dispersi teori hasil analisis FEM. Gambar 5.38 menunjukkan hasil kurva dispersi kecepatan fase dari simulasi FEM. Perbandingannya dengan proses analitik diperoleh hasil bahwa perambatan gelombang seismik pada suatu media menggunakan matrik kekakuan dinamik dapat dianalisis dengan baik dan dibuktikan melalui analisis FEM memiliki cenderung yang sama. Proses ini membuktikan bahwa analisis numerik menggunakan model kekakuan dinamik untuk mendapatkan kurva dispersi teoritik gelombang permukaan pada perkerasan adalah dapat digunakan.





Gambar 5.34 Hasil simulasi FEM terhadap geometri struktur dan...



Gambar 5.35 Hasil simulasi FEM terhadap parameter *normal stress* gelombang pada

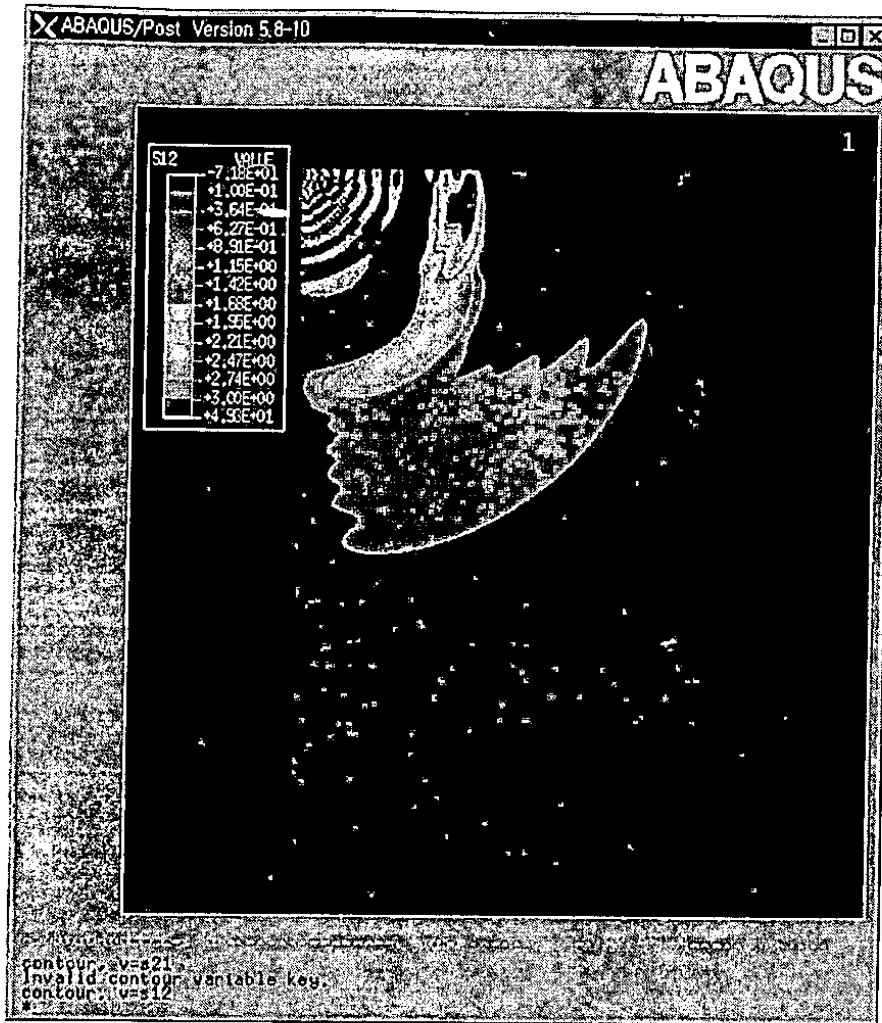
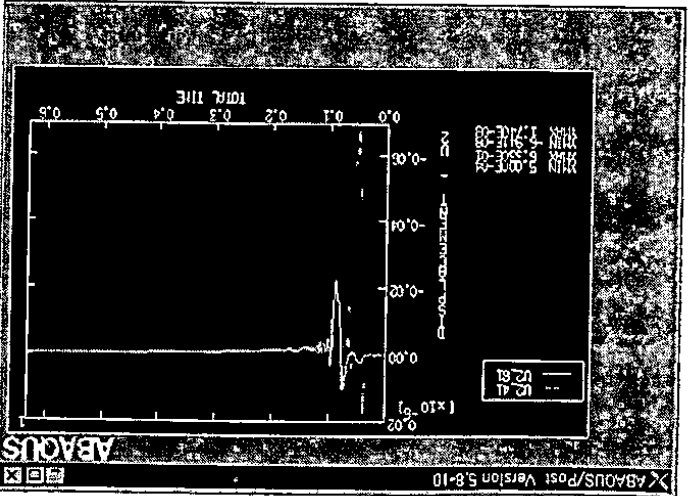
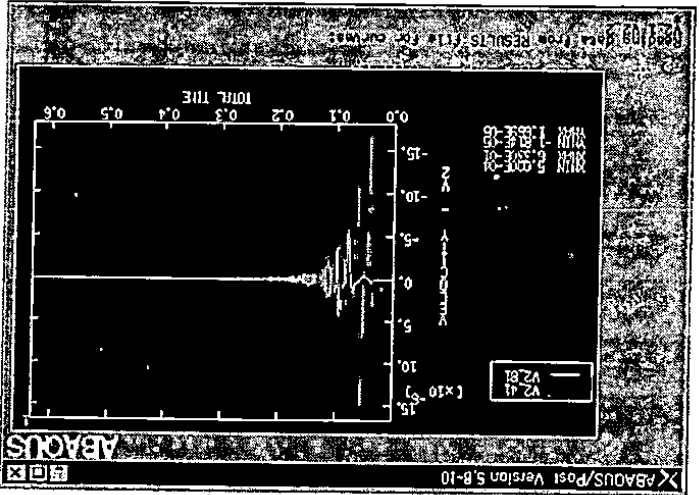
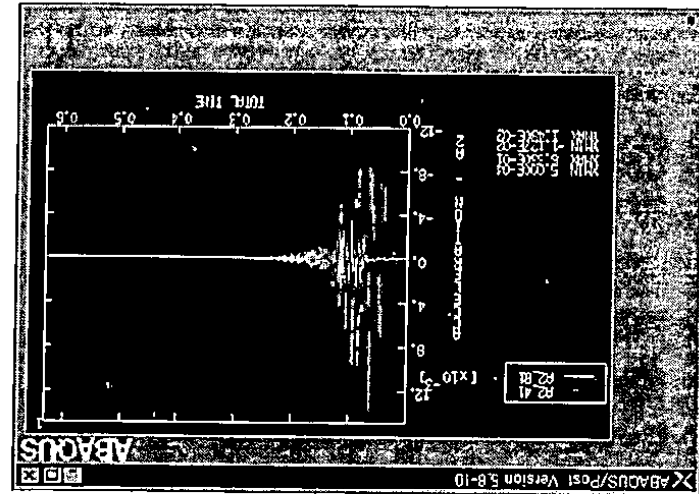
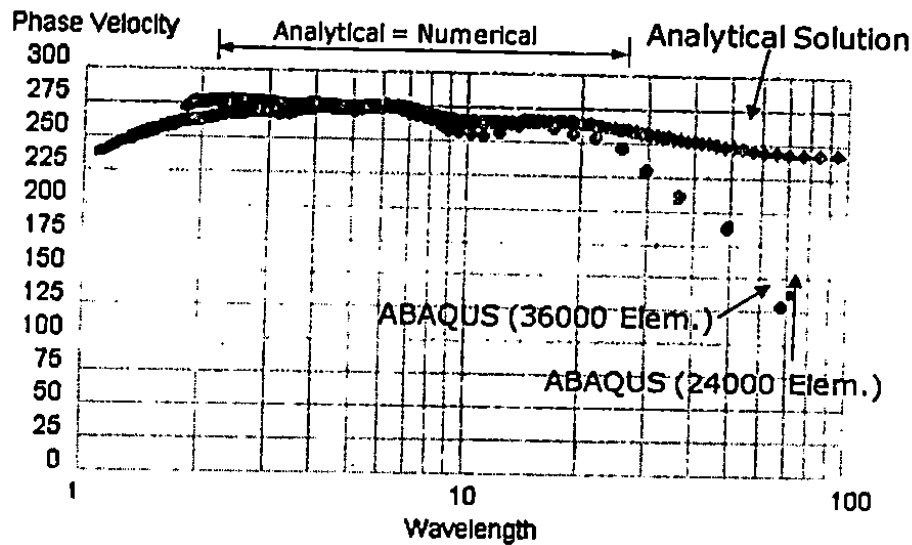


Figure 5.26. Result of a 2D FEM analysis.





Gambar 5.38 Perbandingan hasil simulasi FEM dan proses analitik pada kurva dispersi kecepatan fase

6. Pembahasan Perbandingan Hasil Simulasi 2 D dan 3 D

Secara teori keunggulan model 3 D dapat dijelaskan sebagai berikut. Apabila beban impuls tegak diberikan ke atas media yang berlapis, gelombang yang dihasilkan adalah gelombang permukaan dan tubuh. Kedua-dua gelombang ini merambat secara radial dan masing-masing berbentuk gelombang silinder dan hemisfera. Dalam model 3 D digunakan pemindahan beban impuls kepada seri fungsi silinder yang dikenali sebagai fungsi Bessel yang digunakan untuk mengenali sifat perambatan kedua perambatan gelombang di atas. Selanjutnya jumlah simpangan dan tegangan gelombang dapat diperolehi melalui perhitungan penghuraian beban dalam fungsi vektor melalui seri fungsi Fourier (n) searah *circumferential* dan seri fungsi silinder searah radial. Fungsi Green juga mewakili matrik kekakuan global untuk nilai frekuensi dan nomor gelombang yang ditetapkan. Secara umumnya fungsi 3 D semula sebagai bentuk diskrit (menuliskan kembali dari Persamaan 2.70):

$$\dots i\pi qR \frac{2N}{\pi} (\phi')^2 J_1(kR) H_0^{(2)}(kr)$$

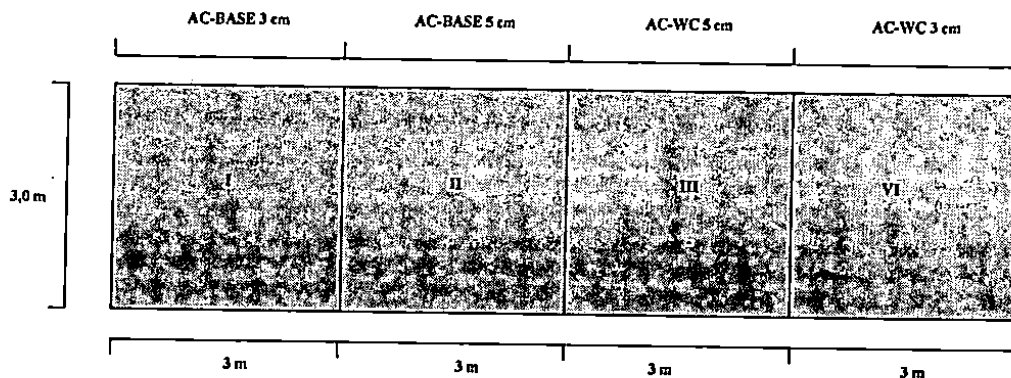
dimana q adalah amplitudo beban disk tegak (*vertical disk load*) pada radial R , r merupakan kedudukan dimana simpangan tegak diukur, $(\phi_z'')^2$ adalah simpangan tegak pada node ke l di permukaan, k_l merupakan nomor gelombang sebagai nilai eigen ke l , J_1 adalah jenis pertama (*first kind*) fungsi Bessel peringkat ke 1 dan $H_0^{(2)}$ adalah jenis kedua (*second kind*) fungsi Hankel peringkat ke 1. Persamaan 2.70 juga memberikan penjelasan teori bahawa analisis 3 D melibatkan peranan kedua gelombang dalam satu perhitungan. Fungsi Bessel digunakan untuk memasukkan pengaruh punca gelombang manakala fungsi Hankel pula digunakan memasukkan perambatan gelombang yang bersifat berasimtot (*asymptotic*) seperti eksponensial kompleks. Jenis kedua fungsi Hankel peringkat n digunakan untuk analisis pergerakan gelombang dari pusat kawasan (*center region*) bergerak kepada medan yang jauh (*far field*).

Analisis 2 D merupakan suatu model yang lebih sesuai digunakan pada profil tanah dengan sifat kekakuan lapisan-lapisannya teratur. Secara teori, model 2 D menyusun beban impuls tegak dari rekaman waktunya dan dihuraikan dalam bentuk komponen frekuensi menggunakan transformasi *Fourier*. Hasil akhir simpangan ini ditentukan dari pengaruh beban impuls untuk setiap frekuensinya menggunakan perhitungan matrik kekakuan. Selanjutnya hasil simpangan ini ditransformasikan dalam rekaman waktu perambatan (domain ruang dan waktu). Model 2 D tidak memasukkan gangguan gelombang tubuh (pantulan gelombang) dalam analisis. Model ini hanya dibataskan pada perambatan luasan gelombang dalam satu arah saja dalam koordinat kartesian.

Dengan demikian, dari hasil simulasi ini diperoleh bahwa untuk menyusun profil perkerasan jalan dari data gelombang seismik lebih tepat untuk menggunakan model matrik kekakuan dinamik untuk 3 D. Perhitungan inversi selanjutnya dalam model rekaman seismik dalam penelitian ini adalah menggunakan model ini.

C. Pembangunan Model Fisik Perkerasan Jalan

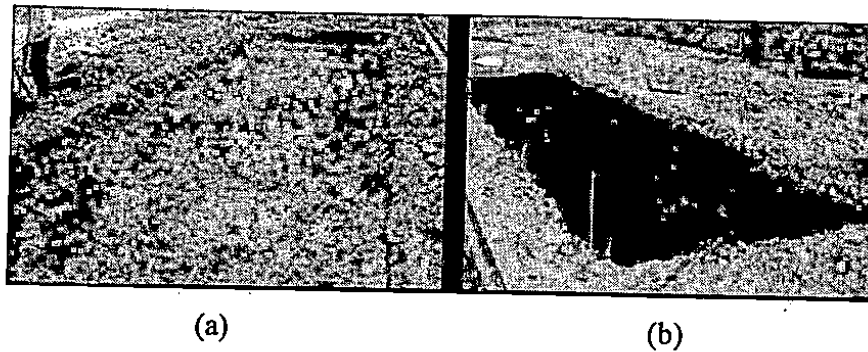
Dalam penelitian ini, model perkerasan jalan sebagaimana telah dijelaskan dalam Bab IV, terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan perkerasan jalan yang merupakan variasi dari jenis perkerasan AC dan ATB, lapisan fondasi dan lapisan tanah dasar yang dipadatkan yang diletakkan di atas tanah asli. Model dibuat di Laboratorium Teknik Transportasi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Layout umum model diberikan dalam Gambar 5.39. Model berdimensi 12 meter panjang yang terdiri dari 4 segmen. Setiap segmennya memiliki panjang 3 meter yang merupakan model perkerasan dengan variasi jenis yang berbeda. Lebar model perkerasan adalah 3 meter panjang. Gambar 5.40 menunjukkan model perkerasan jalan yang telah disiapkan dalam penelitian ini. Pada persiapan model perkerasan ini, tanah asli telah digali sedalam 50 cm, selanjutnya tanah asli dipadatkan. Pemeriksaan bahan dilakukan terhadap tanah asli untuk mengetahui jenis tanah, karakteristik fisik, gradasi dan daya dukung tanah yang direpresentasikan melalui parameter ukur California Bearing Ration (CBR).



Gambar 5.39 Layout model perkerasan dalam penelitian

Pada studi ini, bahan perkerasan agregat yang digunakan dalam penyusunan model perkerasan juga dilakukan pemeriksaan fisik material dan uji mekanik. Bahan agregat dan pasir dalam kajian ini didatangkan dari material lokal yang merupakan bahan galian dari Kali Progo, Yogyakarta. Bahan agregat dan pasir digunakan untuk menyusun lapisan fondasi dan campuran aspal pada lapisan permukaan. Pemeriksaan fisik juga dijalankan pada bahan aspal yang digunakan dalam studi ini. Aspal diperoleh dari hasil produksi

pemeriksaan dan hasil pengujian bahan penyusun model perkerasan dibahas dalam bagian berikut ini.



Gambar 5.40 Model perkerasan jalan pada persiapan lapisan tanah dasar (a) dan pekerjaan pemadatan lapisan perkerasan (b)

1. Sifat Fisik Bahan Penyusun Model

1.1. Bahan Aspal atau Bitumen

Beberapa pemeriksaan penting dasar sifat fisik aspal dan bitumen sebagai bahan model perkerasan jalan yang dilakukan dan persyaratan yang harus dipenuhi oleh bahan aspal diberikan dalam Tabel 5.5 di bawah ini.

Pada kasus ini, nilai penetrasi aspal yang diperiksa pada suhu 25°C menunjukkan nilai yang lebih besar dari batas toleransi aspal penetrasi 60/70. Pengujian pada suhu ruang tersebut disyaratkan karena menjaga mol pada bahan aspal tetap konstan. Hasil pengujian menunjukkan karakteristik aspal penetrasi 80/100. Meskipun demikian, aspal penetrasi 80 masih tergolong untuk aspal keras dan dapat digunakan dalam campuran AC dan ATB, hanya saja kontrol pelaksanaan campuran perlu dilakukan karena angka penetrasi ini menentukan sifat mekanis atau reologi aspal yaitu terkait dengan hubungan antara tegangan dan regangan aspal dalam fungsi waktu. Untuk sifat fisis lainnya masih masuk dalam spesifikasi aspal keras yang baik. Untuk nilai viskositas aspal, hasil pemeriksaan menunjukkan nilai viskositas kinematik yang masih dalam rentang baik untuk

Tabel 5.5 Hasil pemeriksaan bahan aspal untuk model perkerasan

No.	Jenis Pengujian	Metode	Nilai Pengukuran	Persyaratan
1.	Penetrasi, 25 °C; 100 gr; 5 detik; 0,1 mm	SNI 06-2456-1991	86,12	60 - 79
2.	Titik Lembek, °C	SNI 06-2434-1991	56	48 - 58
3.	Titik Nyala, °C	SNI 06-2433-1991	213	Min. 200
4.	Daktilitas 25 °C, cm	SNI 06-2432-1991	110	Min. 100
5.	Berat jenis	SNI 06-2441-1991	1,019	Min. 1,0
6.	Viskositas aspal, cSt	ASTM E-102	> 2500 (100 - 104,5°C) 673,5 (120,5 - 122°C) 230,7 (141 - 145 °C)	---

1.2. Bahan Agregat dan Pasir

Beberapa hasil pemeriksaan bahan agregat kasar dan pasir untuk lapisan permukaan model perkerasan diberikan dalam Tabel 5.6 dan Tabel 5.7, sedangkan untuk lapisan fondasi diberikan pada Tabel 5.8.

Tabel 5.6 Hasil pemeriksaan agregat kasar untuk lapisan permukaan

Pengujian	Standar	Nilai Pengukuran	Persyaratan
Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 03-2417-1991	27,91 %	Maks. 40 %
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 03-2439-1991	97 %	Min. 95 %
Partikel Pipih dan Lonjong*	ASTM D-4791	7 %	Maks. 10 %
Material lolos Saringan No.200	SNI 03-4142-1996	0.1 %	Maks. 1 %
Berat jenis (Bulk Specific Gravity)		2.758	---
Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)		2.831	---
Berat jenis semu (Apparent)	SNI 03-1970-1990	2.976	Min. 2,5
Penyerapan (Absorption) %	SNI-1970-1990	2.650	Maks. 2

Tabel 5.7 Hasil pemeriksaan agregat halus untuk lapisan permukaan

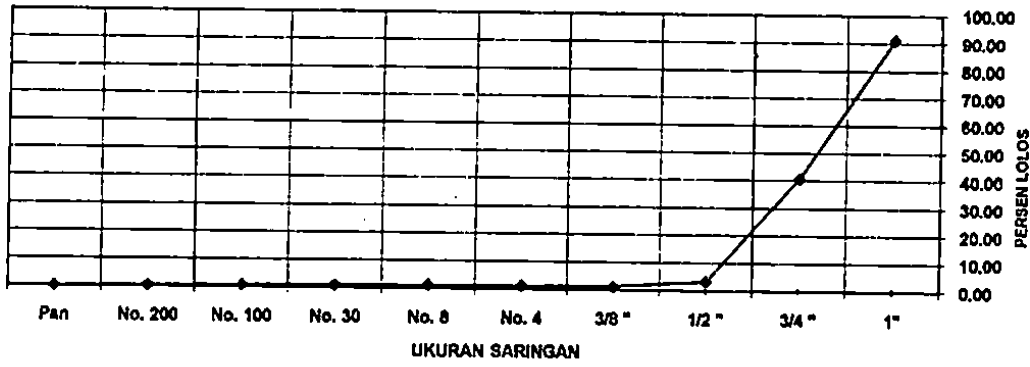
Pengujian	Standar	Pengukuran	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	97 %	Min. 50 %
Material Lolos Saringan No. 200	SNI 03-4428-1997	1,1 %	Maks. 8%,
Angularitas (kedalaman dari permukaan < 10 cm)	ASTM C-1252	58	Min 45
Angularitas (kedalaman dari permukaan \geq 10 cm)		42	Min 40

Tabel 5.8 Hasil pemeriksaan agregat halus untuk lapisan fondasi

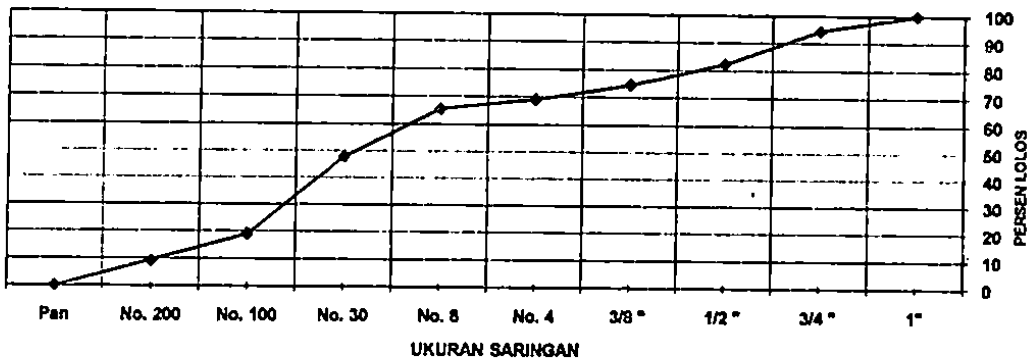
Sifat - sifat	Hasil Pemeriksaan	Kelas A	Kelas B
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 03-2417-1990)	40,39 %	maks 40 %	maks 40 %
Indek Plastisitas (SNI-03-1966-1990)	---	maks 6	4- 10
Hasil kali Indek Plastisitas dng. % Lolos Ayakan No.200	---	maks. 25	-
Batas Cair (SNI 03-1967-1990)	---	maks 25	maks 35
Bagian Yang Lunak (SK SNI M-01-1994-03)	3 %	maks 5 %	maks 5 %

Agregat yang disediakan untuk lapisan permukaan terlihat memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Gradasi agregat kasar, medium dan halus untuk lapisan ini diberikan dalam Gambar 5.41 hingga 5.42, sedangkan gradasi untuk lapisan fondasi diberikan dalam Gambar 5.43 hingga 5.44. Untuk fraksi filler dalam campuran aspal, dalam penelitian ini, bahan tersebut dibeli dari produsen filler sehingga pemeriksaan gradasi tidak perlu dilaksanakan. Untuk bahan agregat kasar dan medium yang mengandung fraksi agregat pipih bagi penyusunan lapisan fondasi pada model perkerasan diberikan dalam Gambar 5.45 dan 5.46.

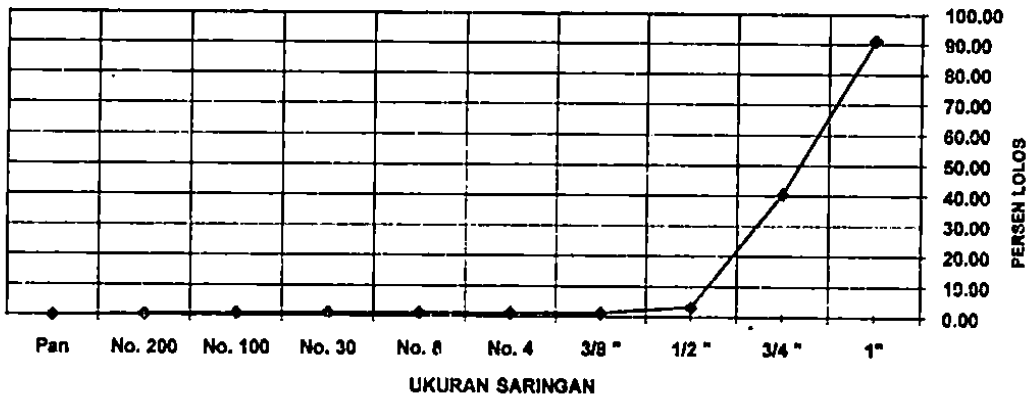
Pemeriksaan indeks plastisitas untuk agregat pada lapisan fondasi tidak dapat diperoleh angka hasil pengukuran karena bahan agregat yang lolos saringan No.200 atau kurang dari 0.075 mm sebesar 0.5 hingga 1 % sehingga tidak dapat diperoleh nilai batas cair pada fraksi halus ini. Pengaruh nilai fraksi hasil dalam lapisan fondasi adalah sangat minimal. Untuk abrasi dari pengujian Los Angles, nilai yang dihasilkan melebihi nilai maksimum yang disyaratkan, meskipun demikian jenis agregat ini masih dapat digunakan dalam model perkerasan mengingat pemadatan yang dilakukan dalam pembuatan model



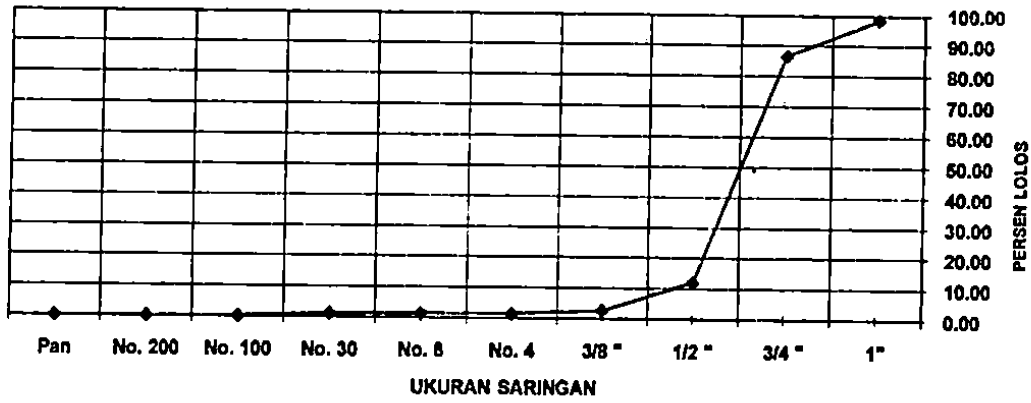
Gambar 5.41 Gradasi untuk ukuran agregat kasar (CA) untuk lapisan permukaan



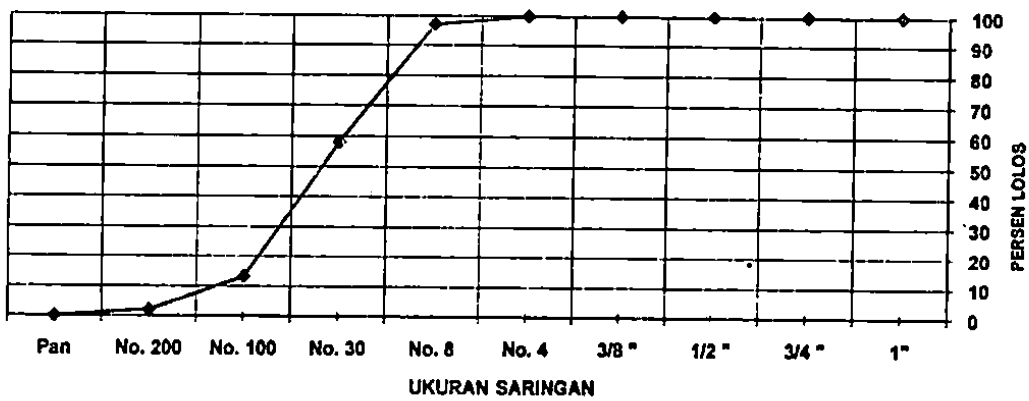
Gambar 5.42 Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) untuk lapisan permukaan



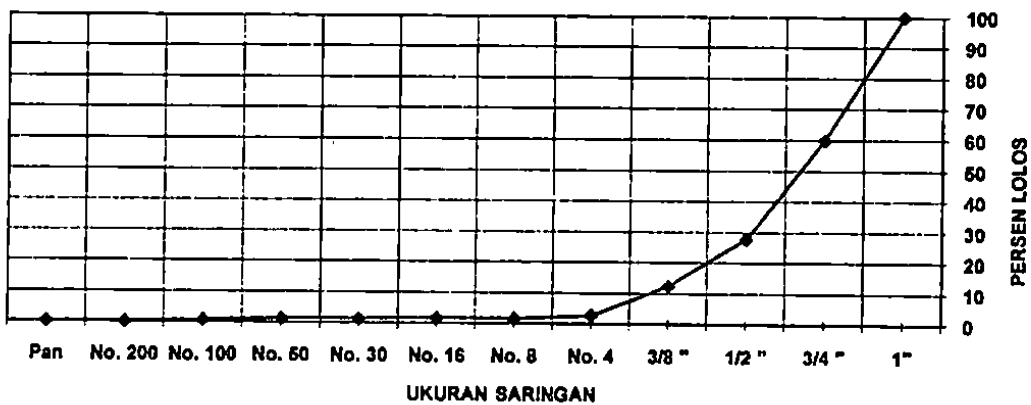
Gambar 5.43 Gradasi untuk ukuran agregat halus (CA) untuk lapisan permukaan



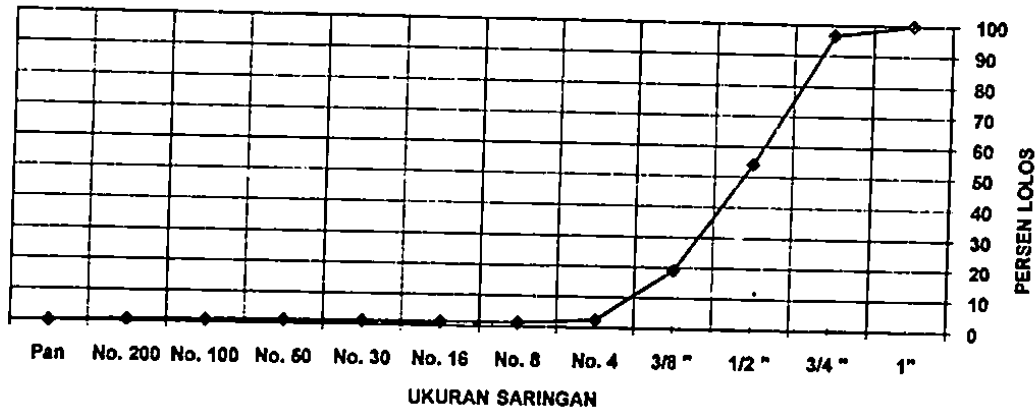
Gambar 5.43 Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) untuk lapisan fondasi



Gambar 5.44 Gradasi untuk ukuran agregat halus (FA) untuk lapisan fondasi



Gambar 5.45 Gradasi untuk ukuran agregat kasar (KA) untuk lapisan fondasi



Gambar 5.45 Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) yang mengandung fraksi agregat pipih untuk lapisan fondasi

1.3. Bahan Tanah Dasar

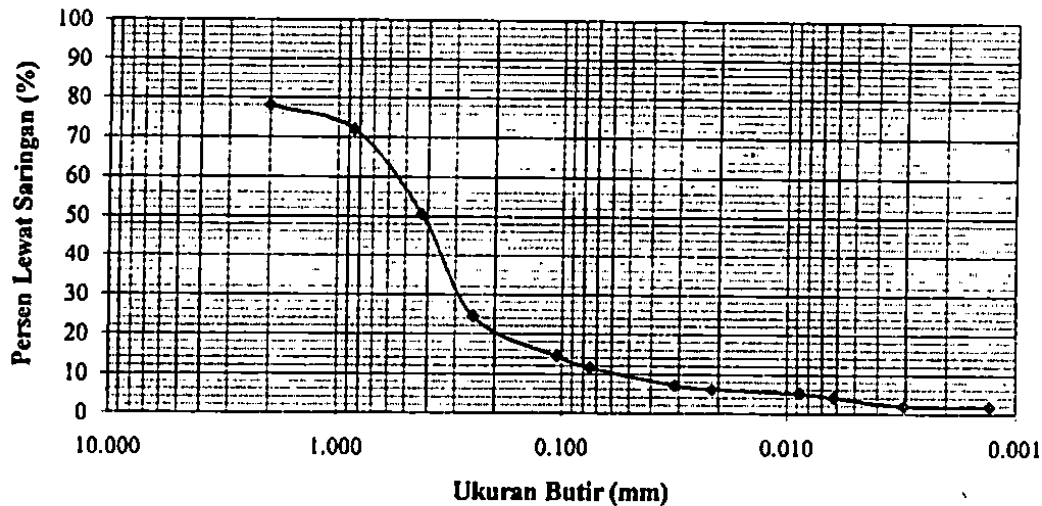
Tujuan pemeriksaan bahan tanah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah untuk menentukan jenis tanah dasar, mengetahui potensi plastisitas dan menentukan nilai disain tanah dasar berdasarkan nilai daya dukungnya. Hasil pemeriksaan tanah dasar tersebut diberikan dalam Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Hasil pemeriksaan tanah dasar

Sifat - sifat	Hasil Pemeriksaan
Berat Jenis	2,681
Indek Plastisitas (SNI-03-1966-1990)	---
Batas Plastis	35.75 %
Batas Cair (SNI 03-1967-1990)	---

Disebabkan oleh fraksi pasir yang cukup besar, batas cair tanah tidak dapat dilaksanakan atau gagal dalam pemeriksaan. Ini disebabkan oleh potensi plastisitas tanah yang sangat rendah. Kondisi ini sangat baik untuk bahan tanah dasar karena potensi ekspansif yang disebabkan oleh fraksi lempung sangat kurang dan daya dukung tanah dasar menjadi lebih baik atau tinggi. Dari hasil pemeriksaan analisis saringan dan hydrometer, dapat ditentukan jenis tanah menggunakan klasifikasi USCS (*unified soil classification system*) atau mengikuti standar ASTM D2487. Gradasi tanah dasar diberikan dalam Gambar

dibandingkan fraksi kerikil (gravel) dan fraksi yang lolos saringan No.200 (0,075 mm) diperoleh dalam klasifikasi 5 – 12 % (USCS). Kondisi iri didukung oleh stratifikasi geologi hasil pengeboran di lokasi yang berdekatan dengan tempat pembuatan model perkerasan sebagaimana diberikan dalam Lampiran II.



Gambar 5.46 Gradasi tanah untuk lapisan tanah dasar pada model perkerasan

2. Sifat Mekanik Bahan Penyusun Model

2.1. Hasil Pemeriksaan Marshall dan Resilien Modulus pada Lapisan Permukaan

Pada penelitian ini, pengujian Marshall dilakukan terhadap sampel lapisan perkerasan jalan baik untuk jenis AC maupun ATB. Pemeriksaan Marshall dilakukan dengan kombinasi kadar aspal 5,5 hingga 7 % dengan selisih pada interval 0,5 %. Komposisi fraksi agregat kasar, medium dan filler dalam rencana campuran (JMF) adalah 42,64 : 56,3 : 1,06 untuk AC dan 68 : 27 : 5. Pada campuran aspal terpasang pada model, kadar aspal yang digunakan untuk jenis perkerasan AC dan ATB masing-masing adalah 6 % dan 5 %. Hasil pemeriksaan Marshall diberikan dalam Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Hasil pemeriksaan Marshall

Jenis AC-WC				
No.Sampel	Kadar Aspal	Nilai Stabilitas (kg)	Nilai Flow (mm)	MQ (kg/mm)
1	5	1126	3.5	289
2	5	894	3.5	
3	5.5	1817	4.5	288
4	5.5	779	4.5	
5	6	1783	4.5	281
6	6	939	5.2	
7	6.5	1313	5.3	279
8	6.5	1280	4.0	
9	7	713	4.0	154
10	7	751	5.5	
Jenis ATB				
1	5	1031	2.7	498
2	5	1905	3.2	
3	5.5	1249	3.3	362
4	5.5	1465	4.2	
5	6	1224	3.9	315
6	6	1076	3.4	
7	6.5	919	3.5	339
8	6.5	1456	3.5	
9	7	1126	3.6	289
10	7	1069	4.0	

Apabila melihat hasil pemeriksaan Marshall dalam Tabel 5.10, ditunjukkan bahwa berdasarkan spesifikasi Bina Marga tahun 1983 dan tahun 1987, nilai stabilitas dan kelelahan perkerasan terpasang pada model telah memenuhi spesifikasi, yaitu untuk lalu lintas berat dengan stabilitas minimum adalah 750 kg dan kelelahan 2 hingga 4 mm. Berdasarkan spesifikasi tahun 2000, untuk kadar aspal terpasang pada perkerasan AC, nilai stabilitas, kelelahan dan MQ masih memenuhi standar yaitu masing-masing parameter disyaratkan minimum 800 kg, minimum 2 mm dan minimum 200 kg/mm. Meskipun demikian untuk perkerasan ATB, seluruh persyaratan dipenuhi kecuali untuk nilai stabilitas dimana syarat minimum adalah 1800 kg sedangkan dalam hasil pengujian nilai stabilitas Marshall rata-rata adalah 1468 kg. Hal ini disebabkan terdapat bias pengukuran dalam sampel kedua dari pengujian Marshall dimana selisih antara sampel pertama dan kedua melebihi 800 kg. Sebagai solusinya ditetapkan nilai stabilitas Marshall untuk perkerasan ATB adalah 1900 kg (dengan nilai kelelahan 3.2 mm) berdasarkan trend nilai kelelahan pada

Secara umum dapat disimpulkan bahwa lapisan permukaan pada model dengan jenis perkerasan ATB bersifat lebih kaku dan keras dibandingkan dengan jenis AC-WC terpasang. Keadaan ini diperkuat dari pengujian *Resilient Modulus* (M_R) yang dilakukan di Pusat Penelitian Jalan dan Jembatan, Departemen Pekerjaan Umum Bandung. Hasil pemeriksaan M_R diberikan dalam Tabel 5.11 dan Tabel 5.12.

Tabel 5.11 Hasil pemeriksaan modulus resilien (M_R) pada lapisan AC

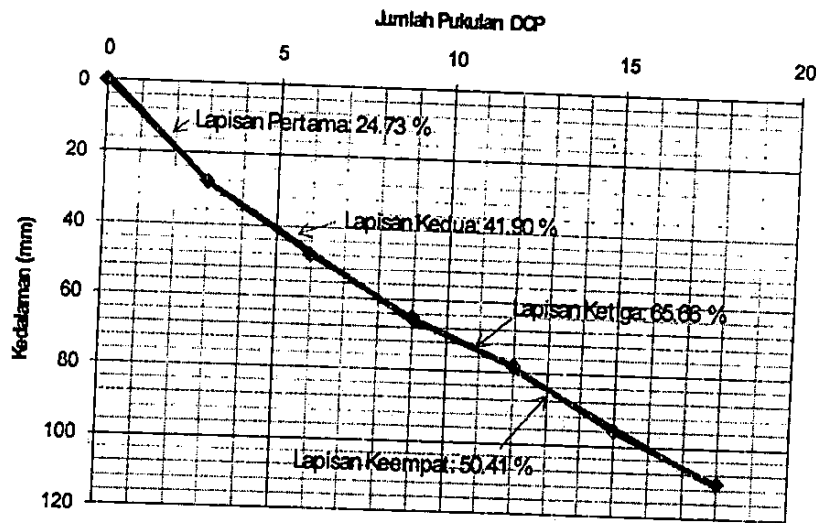
Pulse No.	Force (N)	Total Recov Strain ($\mu\epsilon$)	Tensile Stress (kPa)	RiseTime 0_peak (ms)	LoadTime 0_0 (ms)	Delay at peak (ms)	Resilient Modulus (MPa)
1	2559.8	46.02	226.1	49	119	6	4785
2	2555	45.99	225.7	51	119	1	4779
3	2531.2	46.02	223.6	50	121	8	4731
4	2505	44.9	221.2	49	118	8	4799
5	2509.8	46	221.7	50	119	6	4693
mean	2532.2	45.78	223.6	49.8	119.2	5.8	4757
SD	22.448	0.443	1.983	0.748	0.979	2.5612	39.36
CV%	0.8865	0.968	0.886	1.502	0.821	44.159	0.827

Tabel 5.12 Kesimpulan hasil pemeriksaan modulus resilien (M_R)

No	Sampel	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	AC-1	25	4757
2	AC-2	25	4879
3	ATB-1	25	5781
4	ATB-3	25	5252

2.2. Nilai DCP, CBR Lapangan dan Prediksi Modulus Elastik untuk Lapisan Fondasi dan Tanah Dasar

Pengujian DCP dilakukan ke atas bahan fondasi model perkerasan jalan. Pengujian ini diperoleh hasil plotting kedalaman penetrasi kerucut DCP terhadap jumlah pukulan. Salah hasil pengukuran diberikan dalam Gambar 5.47. Dari Gambar 5.47 dapat dihasilkan nilai indeks DCP dan nilai CBR dari model empiris Kleyn dan van Harden (Persamaan 4.39) untuk kerucut bersudut 60° dan berat pemukul 8 kg. Hasil lengkap dari titik pengukuran DCP beserta nilai CBR lapangan dan prediksi nilai modulus elastisitas



Gambar 5.47. Hasil pengukuran DCP pada lapisan fondasi model perkerasan

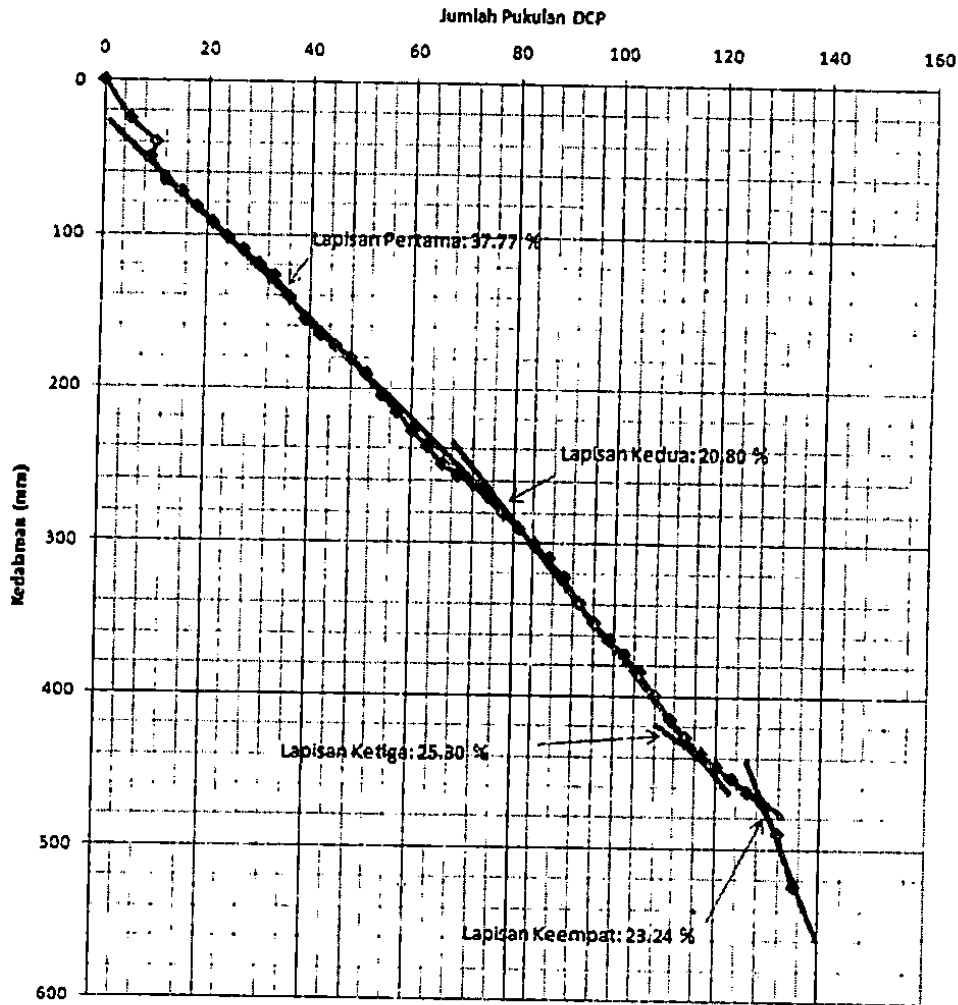
Tabel 5.13. Hasil pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi

Lapisan	Ketebalan mm	Jumlah Pukulan	Indeks DCP mm/pukulan	Lapisan Log CBR	Lapisan CBR(%)	Lapisan E (MPa)
Lapisan 1	28	3	9.33	1.39	24.73	255.72
Lapisan 2	37	9	6.17	1.62	41.90	433.40
Lapisan 3	13	12	4.33	1.82	65.66	679.12
Lapisan 4	32	18	5.33	1.70	50.41	521.38

Tabel 5.14. Statistik seluruh pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi pada lapisan fondasi model perkerasan

Jumlah Data = 20	Indeks DCP (mm/pukulan)	CBR (%)	Modulus Elastik (MPa)
Rerata	5.95	42.97	446.83
SD	1.79	11.11	115.02
CV	0.22	0.26	0.26

Analisis yang sama juga dilakukan pada lapisan tanah dasar yang dipadatkan pada model perkerasan jalan. Salah satu hasil analisis DCP dan kesimpulan statistik hasil pengukuran diberikan dalam Gambar 5.48 dan Tabel 5.15.



Gambar 5.48. Hasil pengukuran DCP pada lapisan tanah dasar dipadatkan model perkerasan

Tabel 5.15. Hasil pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi

Lapisan	Ketebalan mm	Jumlah Pukulan	Indeks DCP mm/pukulan	Lapisan Log CBR	Lapisan CBR (%)	Lapisan E (MPa)
Lapisan 1	281	42	6.69	1.58	37.77	390.68
Lapisan 2	139	55	10.69	1.32	20.80	215.09
Lapisan 3	55	61	9.17	1.40	25.30	261.66
Lapisan 4	49	66	0.80	1.27	23.24	215.09

Tabel 5.16. Statistik seluruh pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi pada lapisan tanah dasar model perkerasan

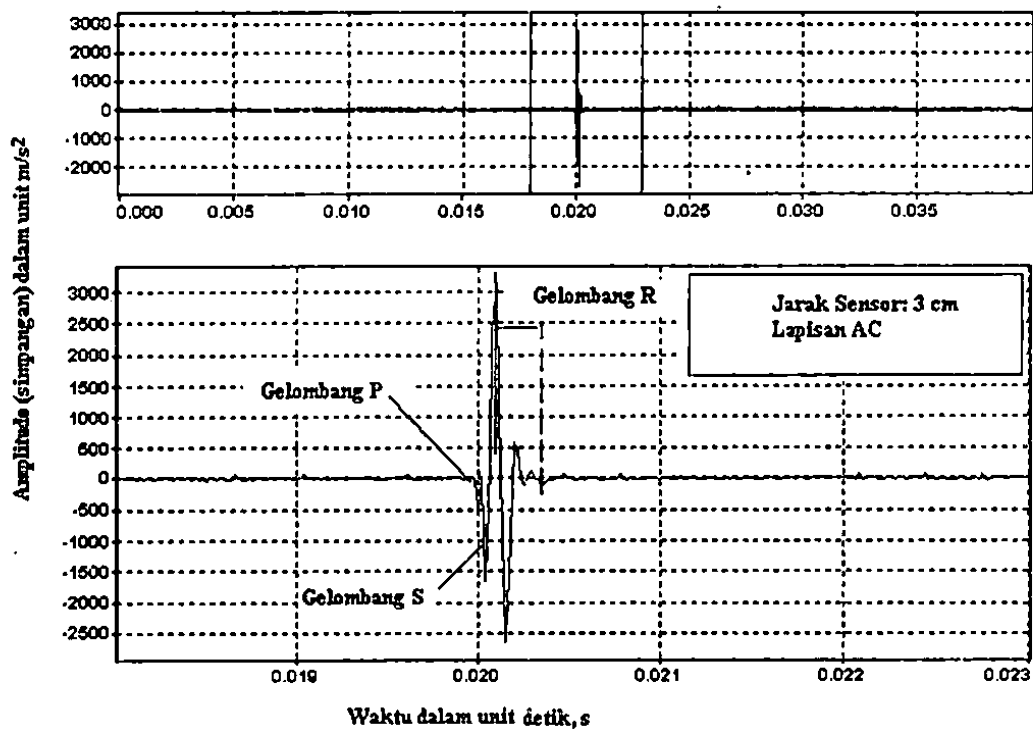
Jumlah Data = 20	Indeks DCP (mm/pukulan)	CBR (%)	Modulus Elastik (MPa)
Rerata	9.35	26.07	269.68
SD	1.05	9.26	102.03
CV	0.11	0.14	0.14

Secara umum dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa bahan lapisan fondasi dan lapisan tanah dasar cukup kuat digunakan, berdasarkan nilai daya dukung bahan yang diberikan dalam nilai CBR dan prediksi modulus elastisitasnya. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter komparasi profil modulus elastisitas perkerasan jalan yang dihasilkan dari analisis SASW. Diskusi dan pembahasan mengenai

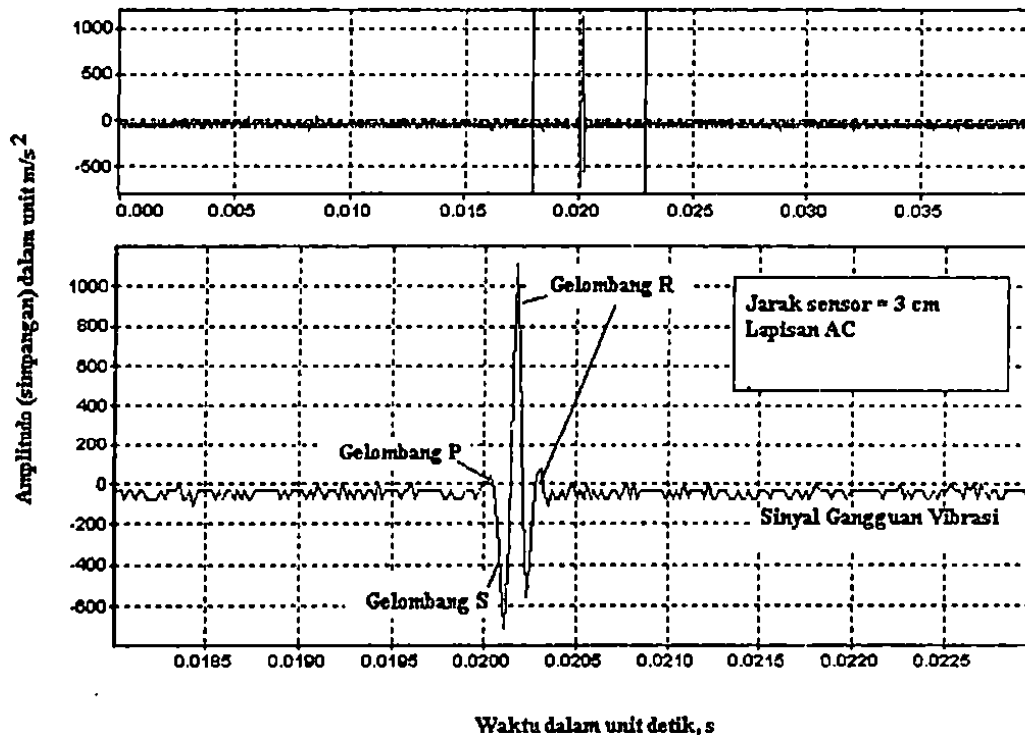
D. Pengukuran dan Analisis Gelombang Seismik pada Model

1. Hasil Pengukuran Gelombang

Salah satu rekaman data gelombang seismik dari hasil pengukuran pada model yang diterima oleh sensor pertama dan kedua dengan jarak antara sensor 3 cm di atas model perkerasan AC diberikan dalam Gambar 5.50 dan Gambar 5.51. Gelombang dihasilkan dari energi mekanik dari impact jatuh bebas bola baja berdiameter kecil untuk memberikan energi perambatan gelombang seismik berfrekuensi tinggi. Dari kedua rekaman sensor gelombang, dapat diamati terdapat tiga jenis gelombang utama yang terdeteksi oleh sensor, yaitu gelombang tubuh P terekam datang pertama kali dengan nilai amplitudo percepatan yang rendah, selanjutnya disusul penerimaan dari gelombang tubuh S dan gelombang permukaan R.

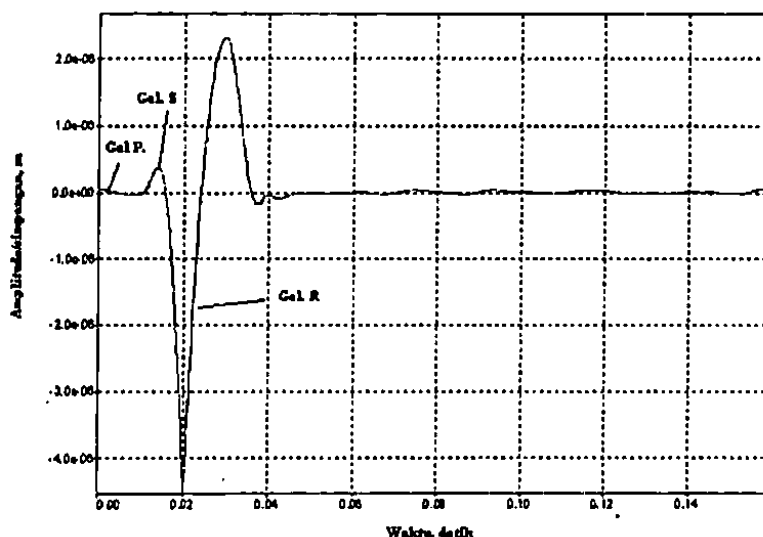


Gambar 5.50 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan



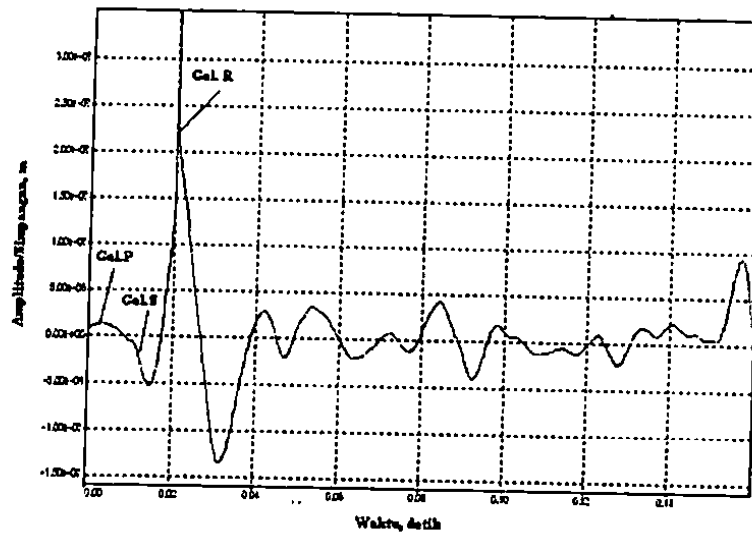
Gambar 5.51 Hasil rekaman sensor kedua untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan AC

Pada jarak pendek (3 cm), sinyal gelombang R yang diterima sensor akan menerima interfensi gelombang tubuh P dan S yang cukup banyak. Selain itu, juga kemungkinan diterimanya energi gelombang dari pantulan gelombang tubuh (terutama P) cukup besar karena gelombang ini memantul dari interface jarak dekat (ketebalan 3 cm) lapisan permukaan dan fondasi perkerasan jalan yang berbeda nilai kekakuannya. Gelombang pantulan ini nampak dari beberapa corak gelombang P yang diterima dan gelombang S. Amplitudo gelombang R yang diterima menunjukkan magnitudo yang tinggi dan nilainya gelombang segera berkurangan searah waktu perambatannya yang terlihat dari pengurangan energi pada nilai amplitudo di sensor pertama dan kedua. Kondisi ini sesuai dengan kajian teori bahwa sekitar 67 % energi gelombang mekanis dirambatkan dalam bentuk gelombang R. Karakteristik ini juga menunjukkan adanya peredaman gelombang pada material perkerasan jalan. Untuk melihat efek dissipatif energi ini, Gambar 5.52 memperlihatkan rekaman amplitudo gelombang seismik dari Gambar 5.50 dan Gambar 5.51 yang diterjemahkan dalam unit simpangan (meter). Gelombang P membentuk simpangan yang kecil di awal perekaman data, yang selanjutnya diikuti oleh gelombang S. Untuk gelombang R sendiri, menghasilkan simpangan gelombang terbesar berbentuk sinusoidal yang selanjutnya terlihat energi gelombang akan teredam

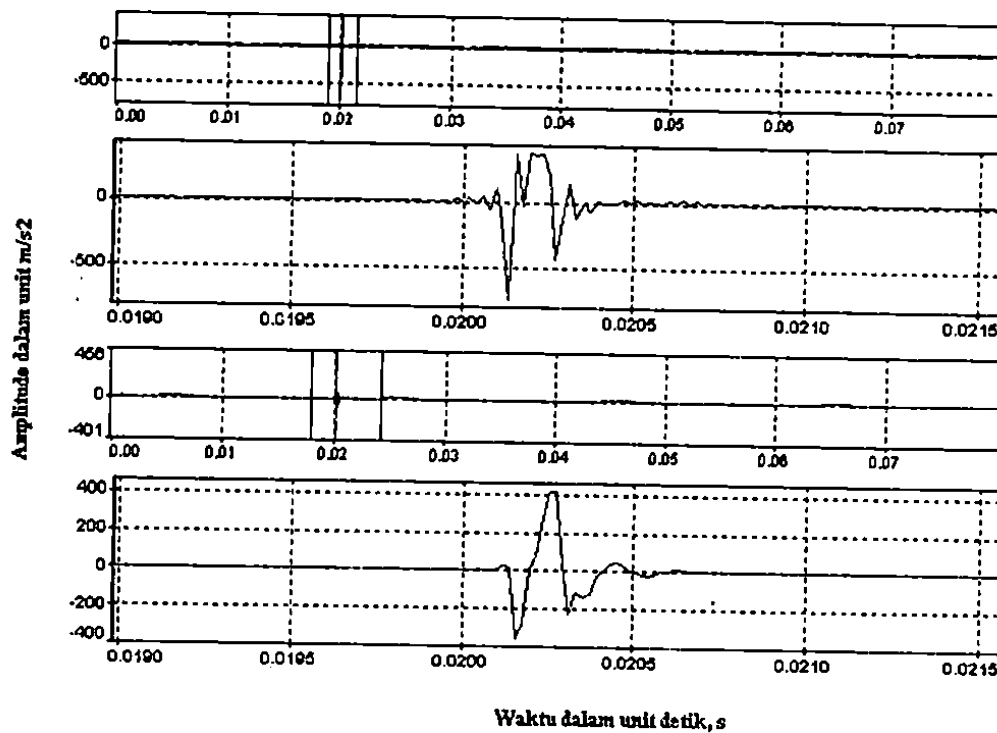


Gambar 5.52 Spektrum simpangan sensor pertama dalam jarak sensor 3 cm lapisan AC

Spektrum simpangan berdomain waktu untuk sensor kedua (Gambar 5.53) terlihat berbeda dari sensor pertama. Hal ini disebabkan energi yang diterima oleh sensor kedua terlihat berkurang dan corak gelombang (waveform) pun terekam sederhana dan tidak panjang (Gambar 5.51). Meskipun demikian, simpangan gelombang R terlihat sebagai dominasi energi dalam rekaman seismik yang diterima oleh sensor. Bentuk sinusoidal masih terlihat dalam corak gelombang R. Beberapa corak gangguan gelombang nampak dalam Gambar 5.53, meskipun demikian gangguan tersebut tidak mempengaruhi secara keseluruhan rekaman data gelombang. Untuk model perkerasan ATB, rekaman data seismik dari pengukuran lapangan diberikan dalam Gambar 5.54. Dari bentuk gelombang yang diterima, memiliki kesamaan dan identik dengan rekaman data untuk lapisan perkerasan AC. Meskipun demikian, terdapat perbedaan dalam jumlah puncak gelombang yang mungkin disebabkan perbedaan jenis material. Impuls yang dihasilkan dari perkerasan ATB lebih singkat dan pendek, yang biasanya dimunculkan akibat nilai ketebalan bahan yang lebih tipis. Diduga dan pembuktian ini dibahas dalam sub bab



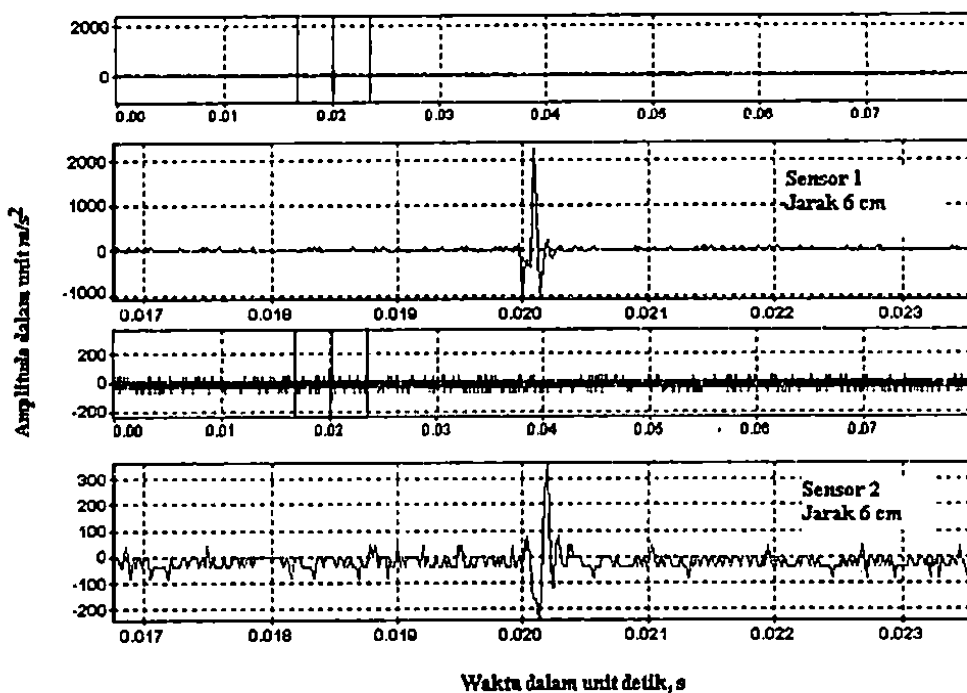
Gambar 5.53 Spektrum simpangan sensor kedua dalam jarak sensor 3 cm lapisan AC



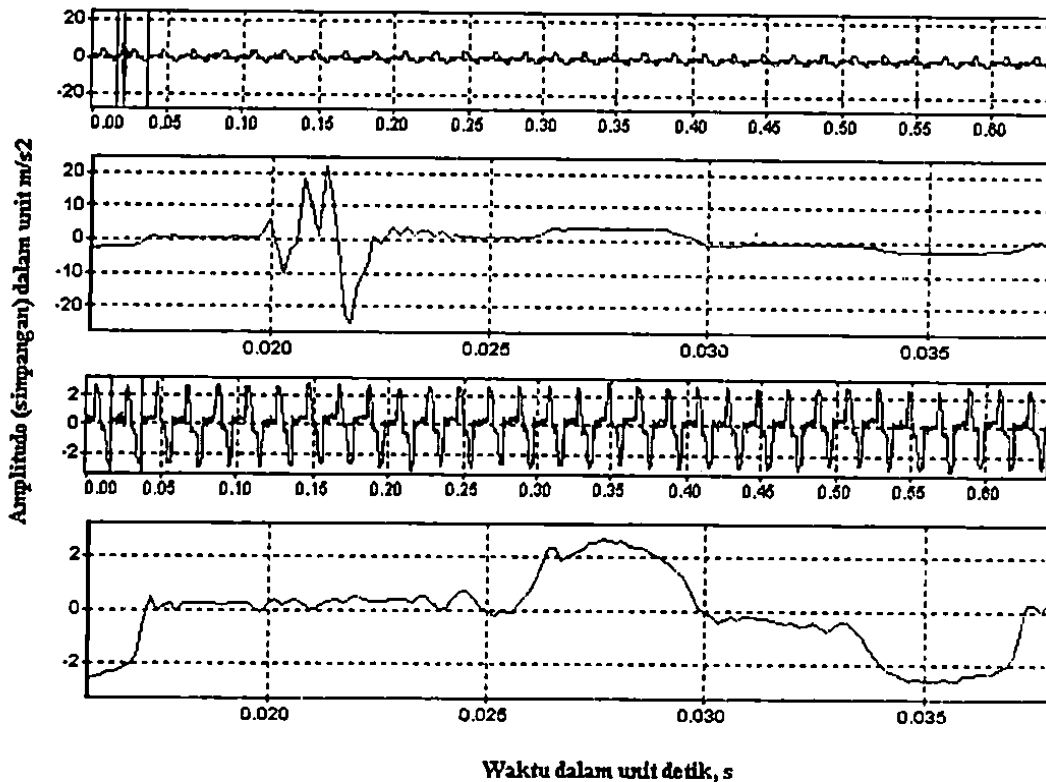
Gambar 5.54 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 3 cm model ATB

Corak rekaman gelombang dari sensor pertama dan kedua untuk pengukuran jarak antar sensor yang lebih panjang, yaitu 6, 12, 24, 48 dan 100 cm adalah serupa. Meskipun demikian, terdapat ciri khusus untuk rekaman 24 cm ke atas, bahwa energi gelombang P dan S sangat dominan.

minimal, sebagaimana terlihat dalam perbandingan antara rekaman gelombang untuk jarak sensor 6 cm dan 100 cm (Gambar 5.55 dan 5.56). Khusus untuk jarak 100 cm, corak gelombang seismik ditunjukkan sangat sederhana yaitu 1. hingga 2 corak sinusoidal saja. Ini karena interferensi gelombang tubuh sudah tidak terekam disebabkan jarak sensor yang jauh dari sumber gelombang, sehingga energi gelombang tubuh dan pantul menjadi hilang sebelum mencapai sensor. Pada kondisi ini, sumber energi perlu dihasilkan dari sumber gelombang mekanik bertenaga besar misalnya berat jatuh bebas atau palu berat. Dalam penelitian ini, palu dengan berat 5 kg dan pelat besi adalah digunakan untuk menghasilkan gelombang seismik adalah berfrekuensi rendah pada jarak sensor ini. Selain sumber gelombang yang berenergi besar, gangguan sinyal berfrekuensi lebih rendah terkadang muncul akibat kondisi lingkungan atau dari sumber gelombang dari sumber getaran lainnya. Sebagaimana terlihat dalam Gambar 5.56 pada sensor kedua, gangguan lingkungan sudah sangat signifikan sehingga pada jarak sensor ini analisis spektrum gelombang dan aplikasi IRF perlu dilakukan secara lebih cermat. Gangguan terlihat dalam bentuk gelombang yang harmonik dan memiliki pattern yang jelas. Ini kemungkinan berasal dari induksi elektrik atau bisa berasal dari getaran dalam bumi (*ground noise*). Dengan demikian, proses penyaringan dilakukan untuk memisahkan gelombang gangguan harmonik dan gelombang impuls.



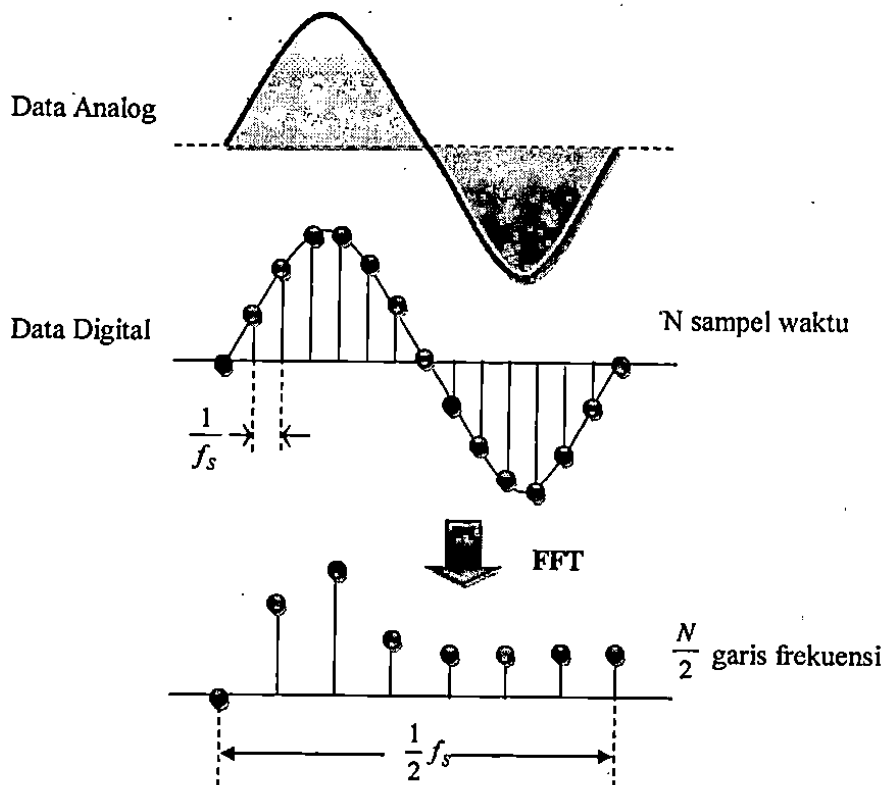
Gambar 5.55. Hasil rekaman sistem aplikasi jarak antar sensor 6 cm model AC



Gambar 5.56 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar-sensor 100 cm model AC

2. Analisis Cooley-Tukey dan Spektrum Gelombang Auto

Analisis selanjutnya yang perlu dilakukan untuk menghasilkan parameter ukur seismik dan parameter teknik untuk kualitas material perkerasan jalan adalah analisis Cooley-Tukey atau analisis FFT. Dalam analisis tersebut, data gelombang seismik berdomain waktu dialihkan/ditransformasikan ke dalam domain frekuensi. Tujuan utama analisis ini adalah mendapatkan parameter seismik yang lebih jelas berdomain frekuensi untuk dianalisis guna mendapatkan sifat bahan jalan. Penggunaan analisis frekuensi ini akan meminimalisasi penggunaan algoritma yang kompleks dalam analisis data seismik

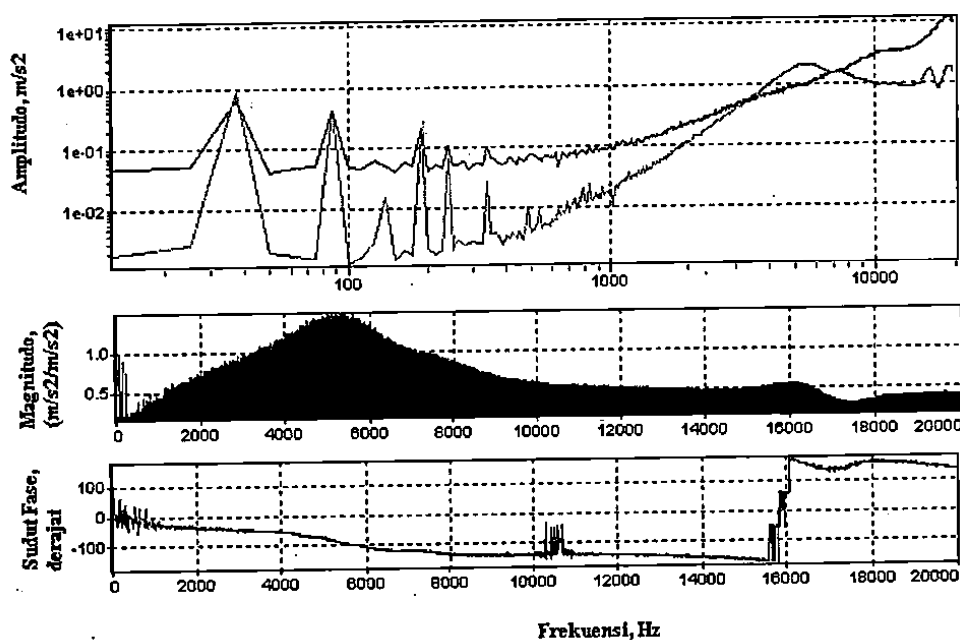


Gambar 5.57 Diagram alir proses FFT untuk tampilan spektrum

Gambar 5.57 menunjukkan diagram proses sederhana tentang analisis domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma Cooley-Tukey atau FFT. Dasar algoritma yang digunakan adalah integral Fourier yang mendiskritkan suatu persamaan menggunakan fungsi dasar sinus dan kosinus. Data analog gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik dikonversikan ke dalam data digital menggunakan ADC atau unit akuisisi (penjelasan alat ini ada dalam bagian metode penelitian, Bab 4). Data blok digital diperlukan oleh algoritma dalam proses FFT untuk merubah domain waktu ke domain frekuensi. Selanjutnya beberapa tampilan spektrum bisa dihasilkan dari spektrum sinyal digital. Proses ini berjalan dalam fungsi linier sehingga aplikasi algoritma tidak kompleks.

Analisis data seismik yang pertama dilakukan untuk mendapatkan respon energi dalam domain frekuensi melalui plot spektrum auto-density. Algoritma untuk membangun spektrum auto-density dapat dilihat dalam Persamaan 2.71 dan 2.75. Gambar 5.58 menunjukkan spektrum auto-density hasil analisis FFT.

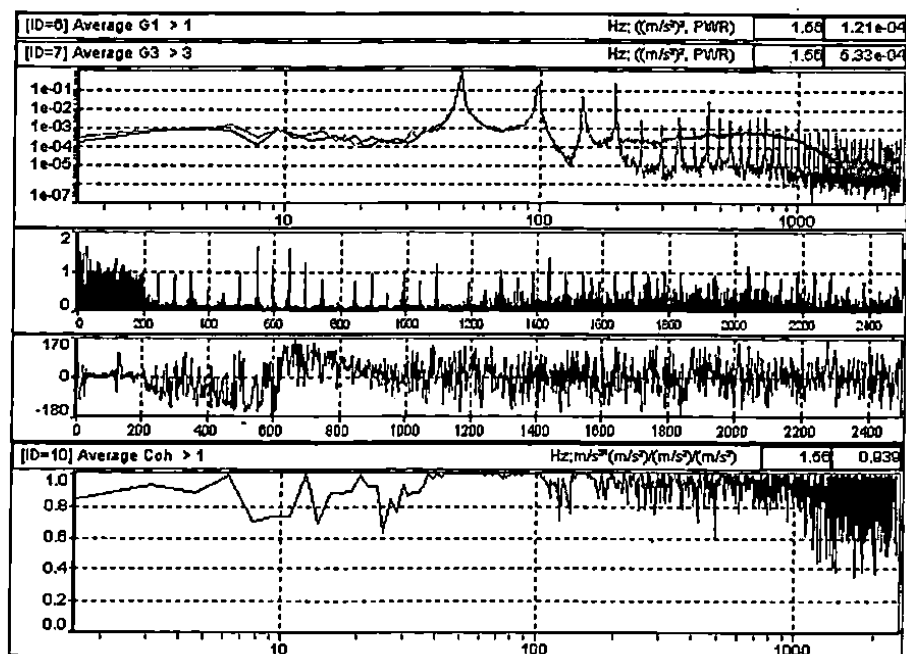
Gambar 5.50 dan Gambar 5.51. Amplitudo gelombang seismik berdomain waktu yang direkam telah ditransformasikan ke bentuk frekuensi. Melalui spektrum ini dapat diperoleh bahwa perambatan gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik (jatuhan bebas bola baja kecil), merambat dengan frekuensi puncak gelombang pada 12 kHz dan berdasarkan analisis wilayah gelombang yang diterima (*acceptable range*) dengan metode Bandwith (Kramer 1996; Rosyidi 2004), diperoleh wilayah frekuensi respon antara 4,43 – 20 kHz. Wilayah gelombang ini menunjukkan frekuensi tinggi dimana sesuai untuk karakteristik bahan yang keras. Pada jarak antar sensor sejauh 4 cm, dengan sumber frekuensi tinggi akan menghasilkan gelombang akan merambat pada permukaan yang dangkal atau lapisan permukaan saja. Ia menunjukkan karakteristik parameter seismik berupa frekuensi respon untuk lapisan perkerasan yang terusun dari campuran aspal. Melalui cara yang sama dengan plot spektrum auto untuk lapisan permukaan jalan, dari jarak sensor 6 dan 12 cm, dan jarak sensor 24, 48 dan 100 cm dapat juga digunakan untuk mendapatkan karakter dari parameter seismik bagi lapisan fondasi dan tanah dasar jalan.



Gambar 5.58 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 3 cm

Pada konfigurasi pengukuran jarak sensor 48 cm ditafsirkan mampu mendeteksi perambatan gelombang seismik pada peralihan lapisan fondasi dan tanah dasar. Melalui

kedua lapisan penyusun perkerasan tersebut dapat dikenali dengan baik. Lapisan fondasi jalan dideteksi memiliki respon frekuensi di atas 200 Hz yang dilihat dari puncak kedua spektrum auto, sedangkan lapisan tanah dasar diidentifikasi pada wilayah frekuensi antara 40 hingga 100 Hz. Wilayah frekuensi di bawah dan atas daerah tersebut menunjukkan corak grafik energi (dalam konteks fungsi amplitudo) yang menurun, sehingga disimpulkan bahwa pada kedua wilayah tersebut, frekuensi gelombang tidak dominan. Sinyal gangguan pun dapat terdeteksi dengan baik menggunakan tampilan spektrum auto pada sensor kedua. Gangguan ini diperoleh karena energi gelombang pada frekuensi di atas 300 Hz yang diterima oleh sensor kedua adalah lemah dan sinyal gangguan dari sumber lain lebih mendominasi dengan corak yang random. Pada keadaan ini, tampilan spektrum telah memberikan informasi respon frekuensi gelombang yang baik bagi pendeteksian respon seismik pada lapisan perkerasan jalan.

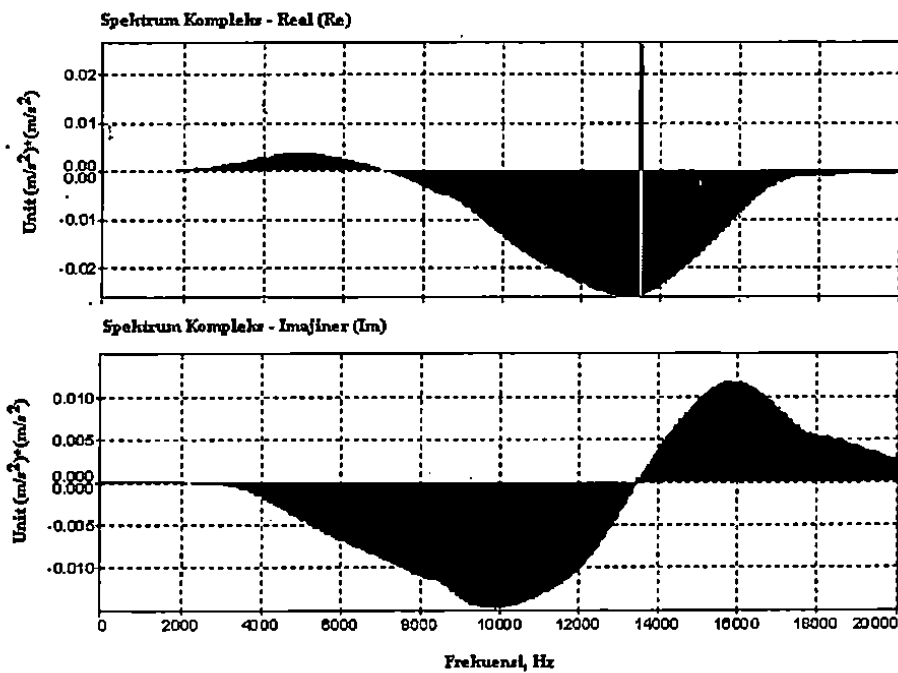


Gambar 5.59 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 40 cm

Analisis spektrum auto tersebut di atas membuktikan bahwa terdapat keuntungan penggunaan algoritma Cooley-Tukey atau metode FFT untuk menganalisis respon dominan gelombang and menentukan karakteristik parameter seismik bahan perkerasan

3. Analisis Spektrum Gelombang Tenaga Silang dan Fungsi Transfer

Untuk mendapatkan karakteristik seismik kekakuan bahan, data spektrum auto perlu terlebih dahulu dianalisis ke dalam spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*) dan fungsi transfer (*transfer function spectrum*). Pengoperasian spektrum tersebut adalah untuk mengidentifikasi kesamaan dan keterkaitan (*similarity*) di antara dua sinyal yang diterima. Fungsi ini juga dikenali sebagai fungsi gerak balas/reaksi frekuensi dalam bentuk perubahan waktu (*time-shift*). Dari data ini diperoleh informasi identitas waktu tertentu yang dideteksi oleh sensor pertama dan selanjutnya sebagai identitas di sensor kedua. Selisih identitas waktu tersebut akan sama dengan selisih waktu untuk mencari kecepatan perambatan gelombang yang merambat di antara kedua sensor. Gambar 5.60 menunjukkan spektrum kompleks dari tampilan spektrum tenaga silang dari pengukuran data seismik pada jarak antar sensor 3 cm. Dari Gambar 5.60 dapat dianalisis dalam bentuk spektrum Nichols/Nyquist untuk melihat plot corak kekompleksan sinyal yang diterima sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 5.61.

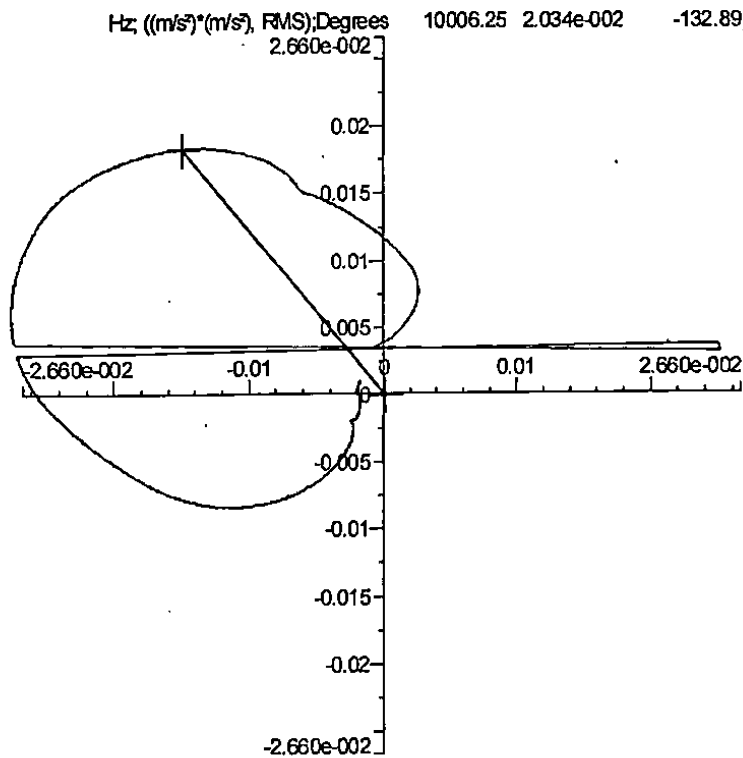


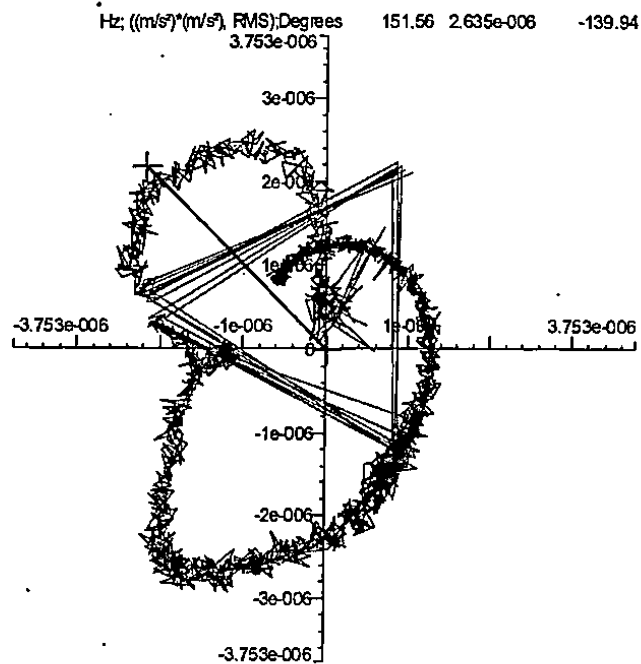
Gambar 5.60 Spektrum-tenaga silang dalam bentuk kompleks untuk jarak sensor 3 cm

Dari spektrum tersebut diperoleh bahwa corak gelombang yang diterima oleh sensor pertama dan kedua dari jarak pengukuran 3 cm adalah sama dan saling terkait. Corak

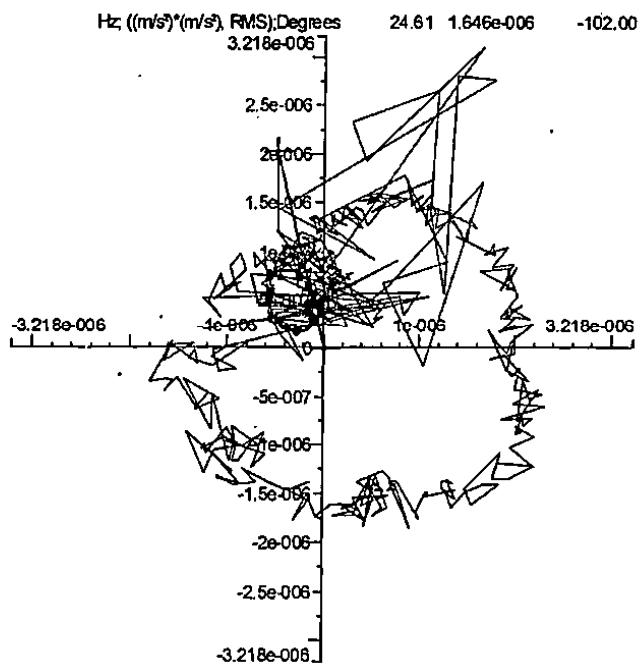
juga mengindikasikan bahwa sinyal gangguan dari sumber lain (misalnya lalu lintas, sumber getaran di sekitar lokasi, gerakan bumi, pengaruh interferensi gelombang listrik, dll.) berfrekuensi tinggi tidak ditemui dalam pengukuran jarak sensor 3 cm.

Kondisi ini berbeda dengan spektrum Nichols/Nyquist pada jarak sensor 48 dan 100 cm. Gambar 5.62 dan Gambar 5.63 menunjukkan tampilan Re dan Im dalam spektrum Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 48 dan 100 cm. Corak spektrum lebih kompleks dan diidentifikasi terdapat sinyal gangguan yang masuk pada frekuensi yang sama dengan gelombang seismik yang dihasilkan dari sumber mekanik. Ini menyebabkan terdapat simpangan random yang dihasilkan dalam spektrum. Pada kondisi ini teknik penyaringan/filtering perlu dilakukan untuk meminimalisasi gangguan tersebut.





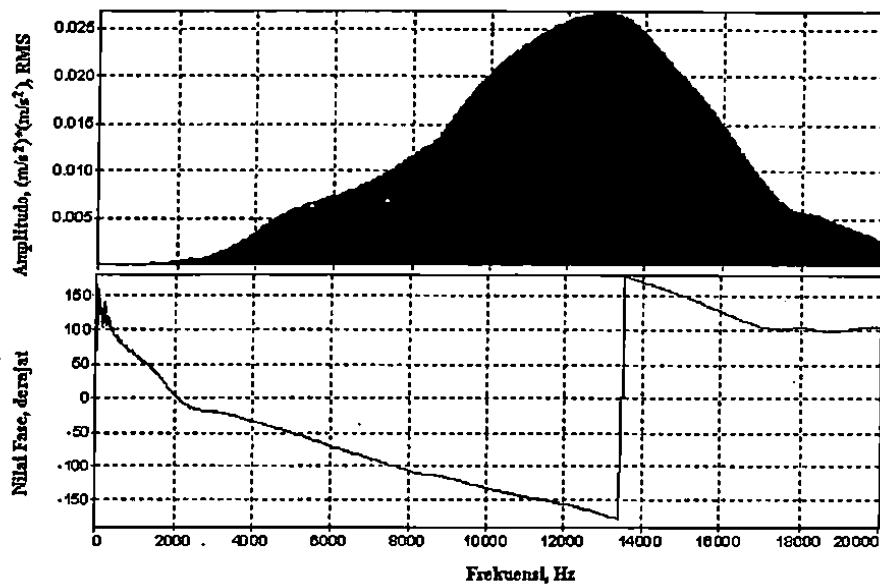
Gambar 5.62 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 48 cm



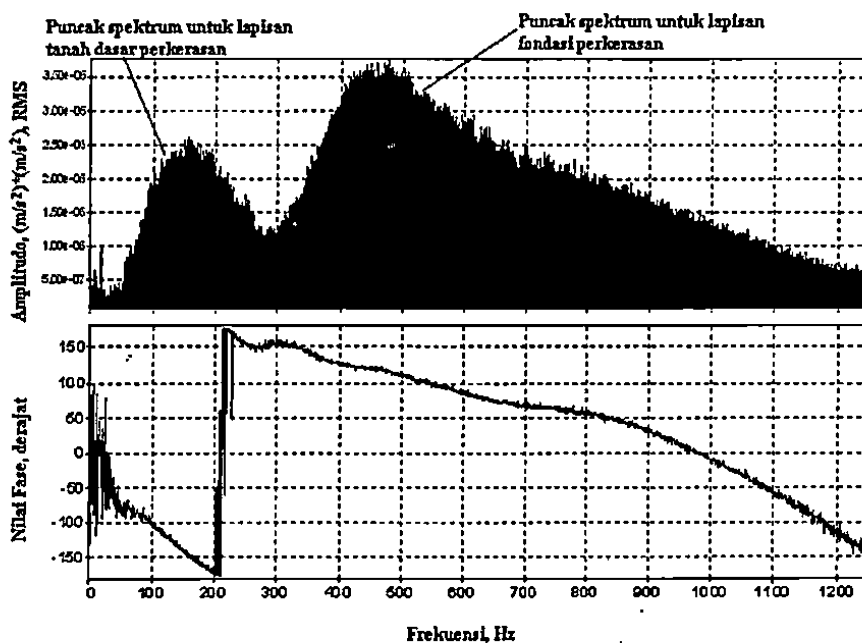
Gambar 5.63 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 100 cm

Gambar 5.64 menunjukkan hasil akhir spektrum tenaga silang dan fungsi transfer dari data seismik pengukuran 3 cm. Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa kejelasan corak gelombang dalam data pengukuran 3 cm (dilihat dari bentuk spektrum Nichols/Nyquist) akan menghasilkan spektrum tenaga silang yang baik yang

menunjukkan kejelasan, kesamaan dan keterkaitan sinyal antara sensor pertama dan kedua. Spektrum fungsi transfer yang dihasilkannya pun menunjukkan satu corak yang baik dan jelas yang ditunjukkan dalam data beda fase sebagai fungsi beda waktu terhadap nilai frekuensinya.

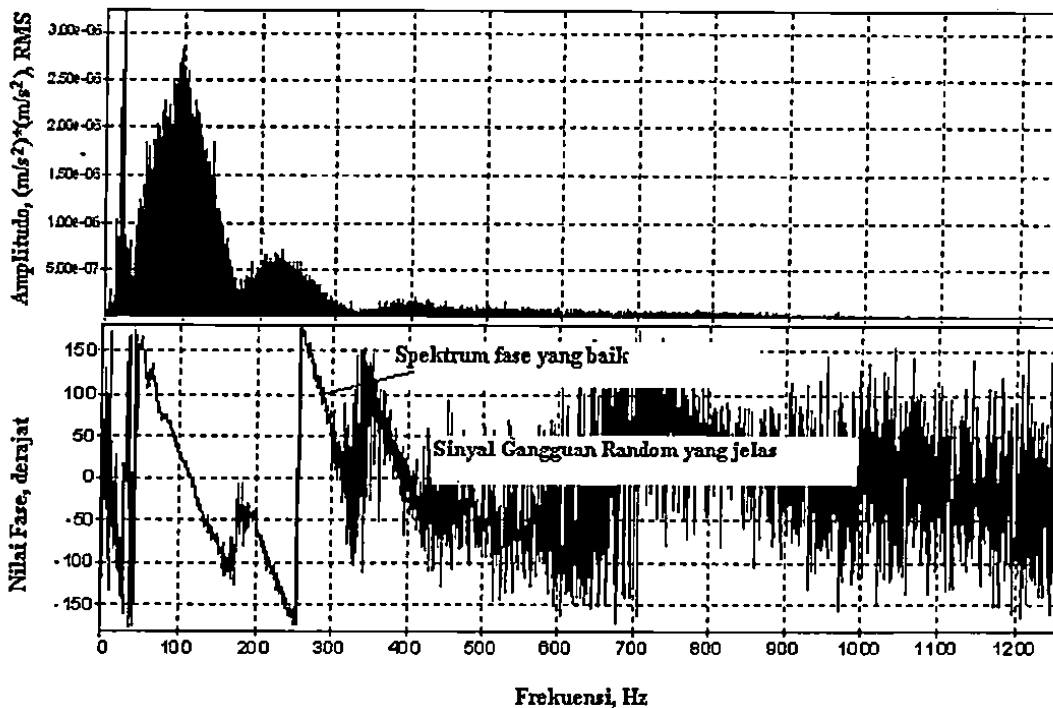


Gambar 5.64 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 3 cm



Gambar 5.65 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 19 cm

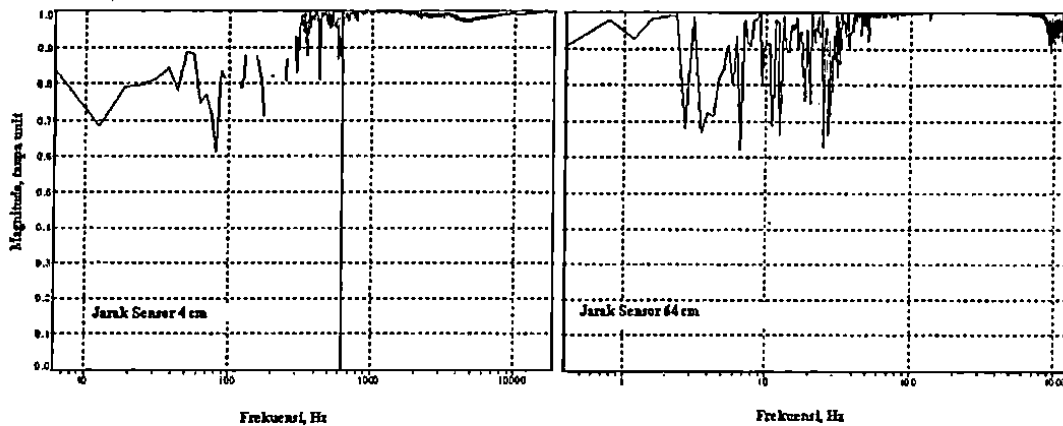
Spektrum gelombang untuk pengukuran 48 cm diberikan dalam Gambar 5.65. Dari gambar spektrum didapati bahwa puncak spektrum silang dideteksi memiliki dua puncak, puncak pertama diindikasikan sebagai wilayah frekuensi untuk lapisan tanah dasar dan wilayah kedua untuk lapisan fondasi. Spektrum fase yang dihasilkan (fungsi transfer) memiliki corak yang jelas, meskipun garis spektrum yang ditampilkan masih menunjukkan adanya gangguan sinyal random yang tidak signifikan. Untuk menunjukkan parameter seismik beda fase gelombang untuk lapisan tanah dasar, Gambar 5.66 menjelaskan spektrum fungsi transfer untuk pengukuran 100 cm. Dari gambar diperoleh bahwa corak yang ditunjukkan memiliki gangguan sinyal random sepanjang frekuensi tangkapan, meskipun demikian plot spektrum fase masih terlihat dengan jelas. Teknik penyaringan *low-band* bisa digunakan untuk meminimalisasi gangguan ini.



Gambar 5.66 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 100 cm

Dari plot spektrum fase terlihat bahwa spektrum dari kedua jarak sensor memiliki wilayah frekuensi yang berbeda. Untuk jarak pengukuran 3 cm, memiliki wilayah frekuensi hingga 20 kHz. Berdasarkan nilai frekuensinya, spektrum fase menunjukkan nilai kecepatan gelombang pada lapisan permukaan aspal. Nilai ini didasarkan bahwa pada frekuensi tinggi dengan panjang gelombang pendek akan dihasilkan nilai kecepatan

gelombang fase yang tinggi pula. Untuk jarak sensor 48 cm, terlihat wilayah frekuensi yang dihasilkan hingga 1200 Hz, data beda fase ini menunjukkan bahwa gelombang merambat pada lapisan dengan nilai kekakuan yang rendah yang direpresentasikan untuk lapisan fondasi atau sebagian lapisan tanah dasar. Sedangkan untuk spektrum fase 100 cm, nilai frekuensi antara 32 hingga 300 Hz menunjukkan eksistensi parameter seismik yang merepresentasikan lapisan tanah dasar yang akan menjadi tumpuan perhatian dalam penelitian ini mendapatkan daya dukung tanah.

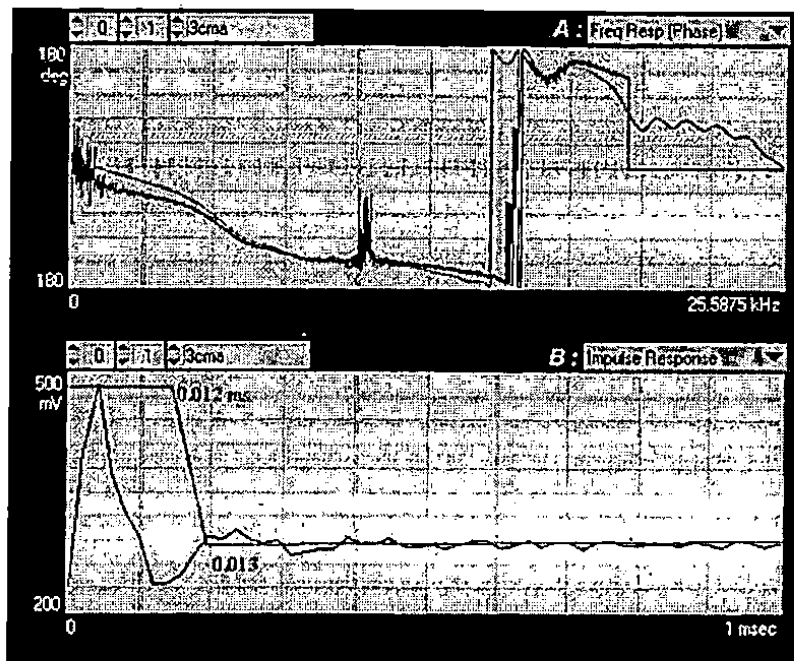


Gambar 5.67 Spektrum koheren hasil analisis untuk jarak sensor 3 dan 48 cm

Untuk menilai kelayakan wilayah frekuensi dari kedua spektrum fase dapat dilihat dari spektrum fungsi koheren. Spektrum ini memperlihatkan keterkaitan sinyal yang diterima oleh sensor pertama dan kedua. Nilai koheren dinyatakan dalam nilai rasio output +1 untuk keterkaitan terbaik dan nilai 0 apabila sinyal di kedua sensor yang diterima tidak berasal dari satu kelompok perambatan gelombang. Gambar 5.67 memperlihatkan hasil spektrum fungsi koheren dari kedua spektrum fase untuk jarak sensor 3 cm dan 48 cm. Berdasarkan spektrum koheren jarak sensor 3 cm, nilai wilayah frekuensi yang baik untuk sinyal yang merambat di kedua sensor adalah 800 Hz – 18,9k Hz dengan nilai koheren minimum 0,983 dan untuk spektrum koheren pengukuran 48 cm diperoleh wilayah frekuensi 85 – 853 Hz dengan nilai 0,982 Kelayakan batas nilai koheren ini minimum sebesar 0,98 sebagaimana menurut pada Al Hunsidi (1992)

E. Analisis Mode Gelombang dan Impulse Response Filtering

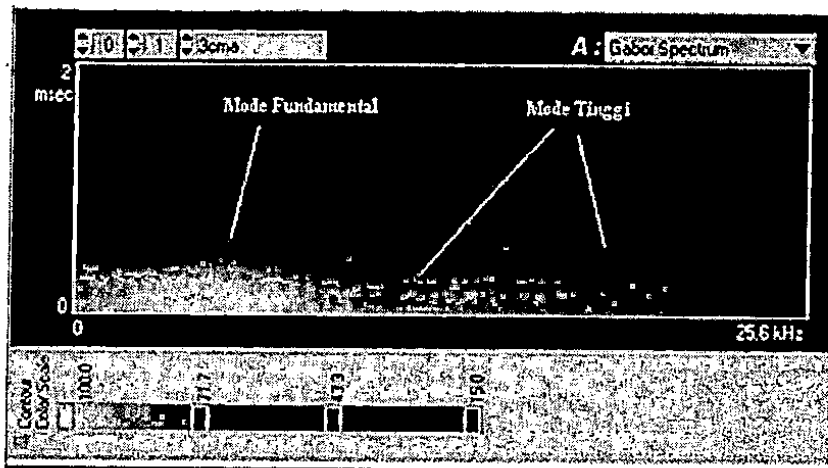
Untuk menganalisis perilaku perambatan gelombang seismik khususnya plotting kepada frekuensi mana yang diperlukan dalam analisis kurva dispersi fase dan rekonstruksi spektrum fase yang lebih baik. Penyaringan respon impuls (IRF) diaplikasikan pada data spektrum fase. Gambar 5.68 menunjukkan analisis IRF dilakukan pada spektrum fase hasil pengukuran pada jarak 3 cm pada model perkerasan. Hasil rekonstruksi spektrum fase ditunjukkan dalam grafik berwarna hijau (garis tipis) dari hasil IRF terhadap spektrum aslinya berwarna biru (garis tebal).



Gambar 5.68 Hasil IRF dan rekonstruksi spektrum fase untuk jarak 3 cm

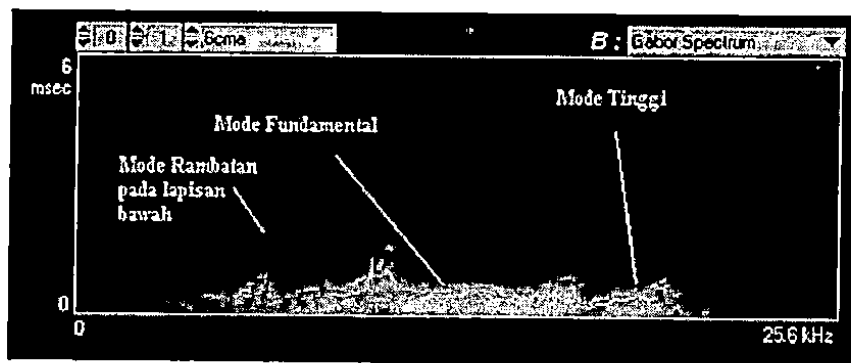
Pemilihan wilayah spektrum fase untuk kurva dispersi perlu mempertimbangkan analisis mode gelombang. Gucunski (1991) telah mengkaji bahwa kurva dispersi pada struktur kompleks dimana suatu lapisan keras diletakkan pada lapisan yang lebih lunak, perlu mempertimbangkan perilaku mode tinggi. Untuk menganalisis mode gelombang, dalam penelitian ini telah digunakan suatu analisis yang disebut sebagai spektrum Gabor. Hasil analisis spektrum Gabor dari spektrum fase (Gambar 5.68) ditunjukkan dalam Gambar 5.69. Analisis melalui spektrum Gabor menunjukkan bahwa mode fundamental merupakan mode dominan yang representatif dari perambatan gelombang permukaan. Hal ini ditunjukkan pada wilayah kontur dominan pada frekuensi rendah. Pada saat

bersamaan, interferensi gelombang tubuh tidak bisa diabaikan, sebagaimana dijelaskan dalam kontur merah di atas batas frekuensi mode fundamental. Waktu kedatangan gelombang permukaan dan tubuh dideteksi pada waktu yang bersamaan. Dengan demikian, pada jarak sensor pendek, peran mode tinggi untuk pembangunan kurva dispersi kecepatan fase gelombang menjadi dipertimbangkan dan penting.



Gambar 5.69 Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak sensor 3 cm

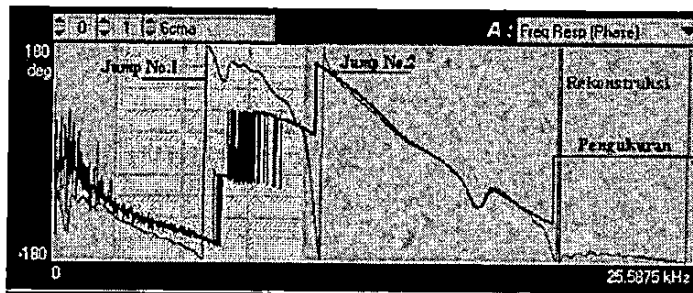
Hal yang berbeda diperoleh pada jarak sensor 6 cm sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.70 berikut ini.



Gambar 5.69 Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak sensor 6 cm

Pada jarak sensor 6 cm, mode fundamental terlihat mendominasi dalam spektrum, sedangkan mode tinggi sudah tidak memberikan efek yang signifikan sebagaimana jarak sensor 3 cm. Hal ini disebabkan oleh energi yang dihasilkan dari sumber gelombang yang diubah menjadi gelombang tubuh.

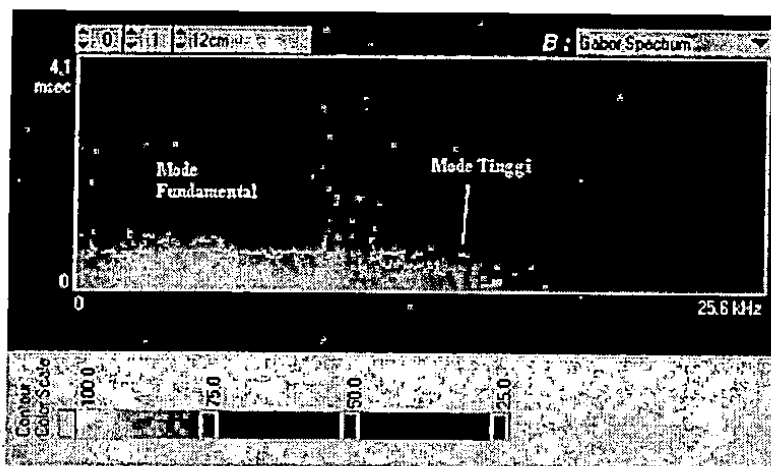
Meskipun demikian, di bawah batas frekuensi mode fundamental terdapat mode fundamental lain yang dimungkinkan berasal dari perambatan gelombang permukaan pada lapisan dibawahnya. Pada proses masking (penyaringan), kondisi ini perlu dipertimbangkan mengingat panjang gelombang permukaan telah melampaui lapisan permukaan aspal. Untuk memberikan penjelasan dari uraian di atas. Gambar 5.71 menampilkan spektrum fase dari pengukuran 6 cm. Dari rekonstruksi spektrum fase terlihat bahwa terdapat dua lompatan/lonjakan spektrum fase tertutup dengan rentang frekuensi yang berbeda. Ini berarti terdapat dua slope atau kemiringan sudut fase yang berbeda yang menunjukkan terdapat dua lapisan terdeteksi dalam pengukuran seismik yang berbeda. Rentang frekuensi lonjakan pertama lebih pendek dibandingkan dengan lonjakan kedua. Kondisi ini memberikan indikasi bahwa lonjakan pertama merupakan lapisan dengan kecepatan fase lebih lambat dibandingkan lonjakan kedua, yang dimungkinkan lapisan tersebut merupakan lapisan fondasi, sedangkan pada lonjakan kedua merupakan lapisan peralihan antara lapisan permukaan aspal dan lapisan fondasi.



Gambar 5.71 Tampilan spektrum fase dari hasil pengukuran dan rekonstruksi untuk jarak sensor 6 cm

Untuk jarak sensor 12 cm, dari spektrum Gabor, terlihat dominasi mode fundamental (Gambar 5.72). Pada jarak sensor ini, gelombang permukaan merambat secara dominan pada lapisan fondasi jalan. Mode tinggi dimungkinkan merupakan lapisan fondasi atas dan mode lonjakan dari perubahan antar lapisan fondasi atas dan bawah, serta lapisan fondasi ke lapisan permukaan aspal. Pada kriteria ini, wilayah frekuensi untuk pembangunan kurva dispersi yang diperlukan dengan mudah ditentukan melalui kelompok mode fundamental ini.

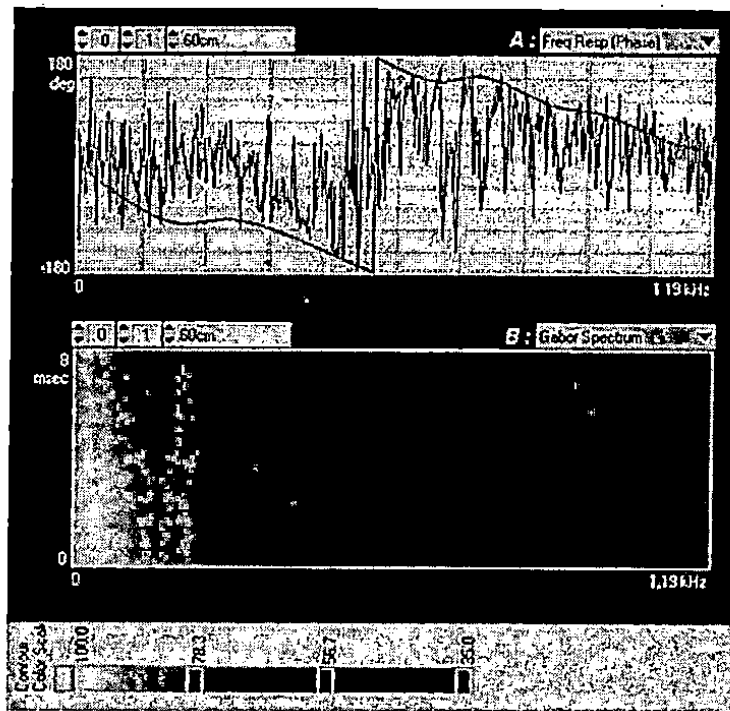
Untuk melihat lebih jauh lagi peran analisis mode fundamental ini, observasi impuls gelombang permukaan melalui spektrum Gabor juga dijalankan kepada data rekaman untuk jarak sensor 60 cm. Gambar 5.73 menjelaskan spektrum fase hasil rekonstruksi dan rekaman data, dan analisis spektrum Gabor yang dilakukan. Dari spektrum Gabor, terlihat sangat jelas bahwa pada jarak sensor ini hanya mode fundamental saja yang diperoleh dari pengukuran. Hal ini karena mode tinggi untuk energi gelombang tubuh hampir seluruhnya telah teredam sehingga tidak mempengaruhi dalam pengukuran. Pada kasus ini, wilayah gelombang yang dikehendaki adalah kelompok frekuensi rendah yang mengindikasikan perambatan gelombang permukaan pada lapisan tanah dasar. Respon spektrum yang sama diperlihatkan dari spektrum Gabor untuk pengukuran jarak sensor 100 cm (Gambar 5.74). Mode fundamental terlihat mendominasi sebagai representasi perambatan gelombang berfrekuensi rendah pada lapisan tanah dasar perkerasan model.



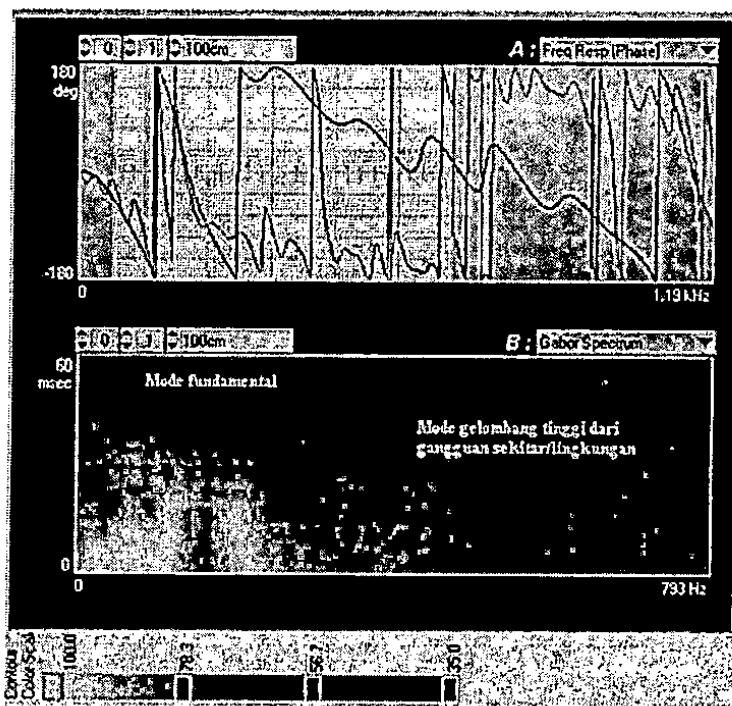
Gambar 5.72 Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak sensor 12 cm

Dari Gambar 5.74 juga memperlihatkan bahwa selain mode fundamental, terdapat pula mode tinggi yang terbentuk dan bersifat konstan. Mode tinggi ini terbentuk dalam beberapa kelompok dan terlihat konsisten, hal ini menunjukkan bahwa terdapat gangguan frekuensi lebih tinggi yang kemungkinan diperoleh dari gangguan lingkungan, aktivitas manusia dan pengaruh dari gerakan bumi. Meskipun demikian, mode gelombang ini tidak mengganggu analisis kurva dispersi. Sebagai tambahan, dalam jarak 100 cm, informasi penting yang dikehendaki adalah penetrasi gelombang permukaan pada lapisan tanah. Aplikasi IRF untuk mendapatkan kurva dispersi yang baik dilakukan. Gambar 5.75 menunjukkan respon impuls dan kriteria penyarian yang dilakukan dalam penelitian ini. Batas penyarian IRF mode fundamen dapat ditentukan sebagai nilai

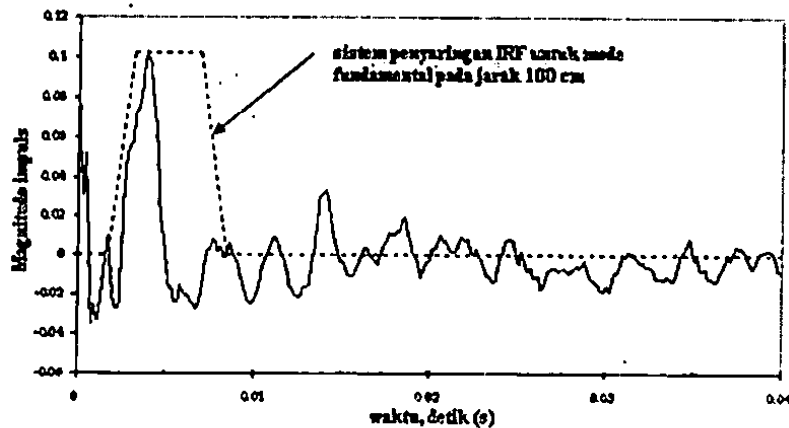
berhenti (*stopband*) pertama yang bermula dari 0 hingga 0.00345 detik sedangkan manakala jalur berhenti kedua adalah 0.00972 detik hingga seterusnya. Untuk jalur lolos (*passband*) ditentukan pada wilayah 0.004013 hingga 0.00956 detik.



Gambar 5.73 Sepktrum fase dan spektrum Gabor untuk jarak sensor 60 cm

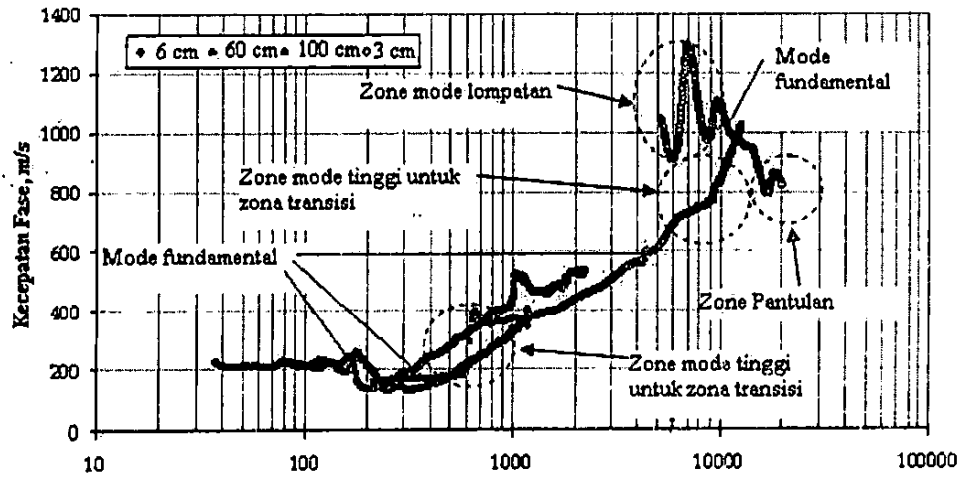


Gambar 5.74 Spektrum fase dan spektrum Gabor untuk jarak sensor 100

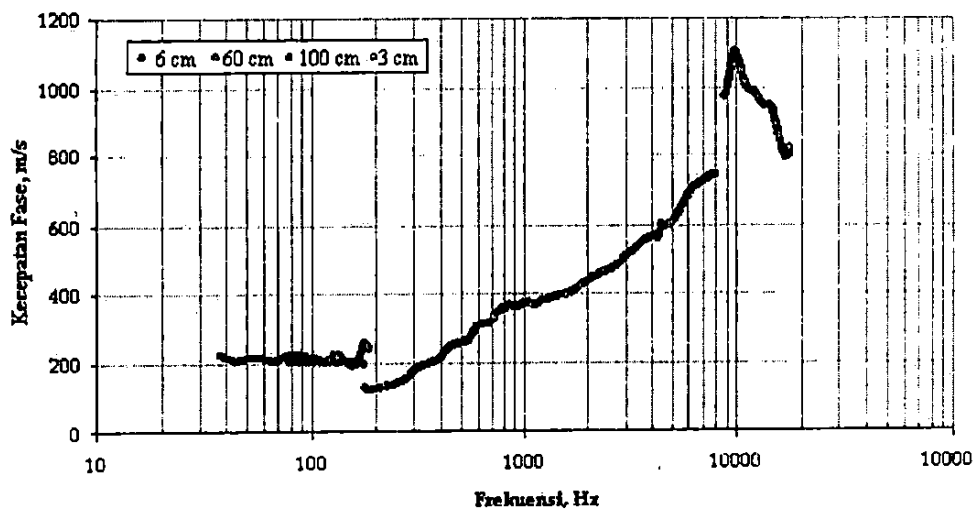


Gambar 5.75. Penyaringan respon impuls mode fundamental pada jarak 100 cm

Gambar 5.76 menunjukkan contoh hasil analisis kurva dispersi eksperimen sebelum dan sesudah IRF. Gambar 5.76a menunjukkan masalah yang timbul dalam kurva dispersi untuk profil perkerasan apabila tidak dianalisis respon impuls dan kesukaran dalam plotting mode fundamental gelombang. Kesukaran analisis data bagi jarak sensor yang pendek adalah mode tinggi yang berasal dari lompatan dan pengaruh gelombang tubuh, sedangkan masalah utama bagi jarak sensor yang panjang adalah perbedaan antara mode rendah dan tinggi yang akan digunakan. Gambar 5.76b merupakan kurva dispersi eksperimen dari hasil IRF yang mana IRF dibuktikan mampu meminimumkan kesalahan analisis dan interpretasi dalam penanganan realitas gelombang permukaan untuk



(a) Sebelum Proses IRF

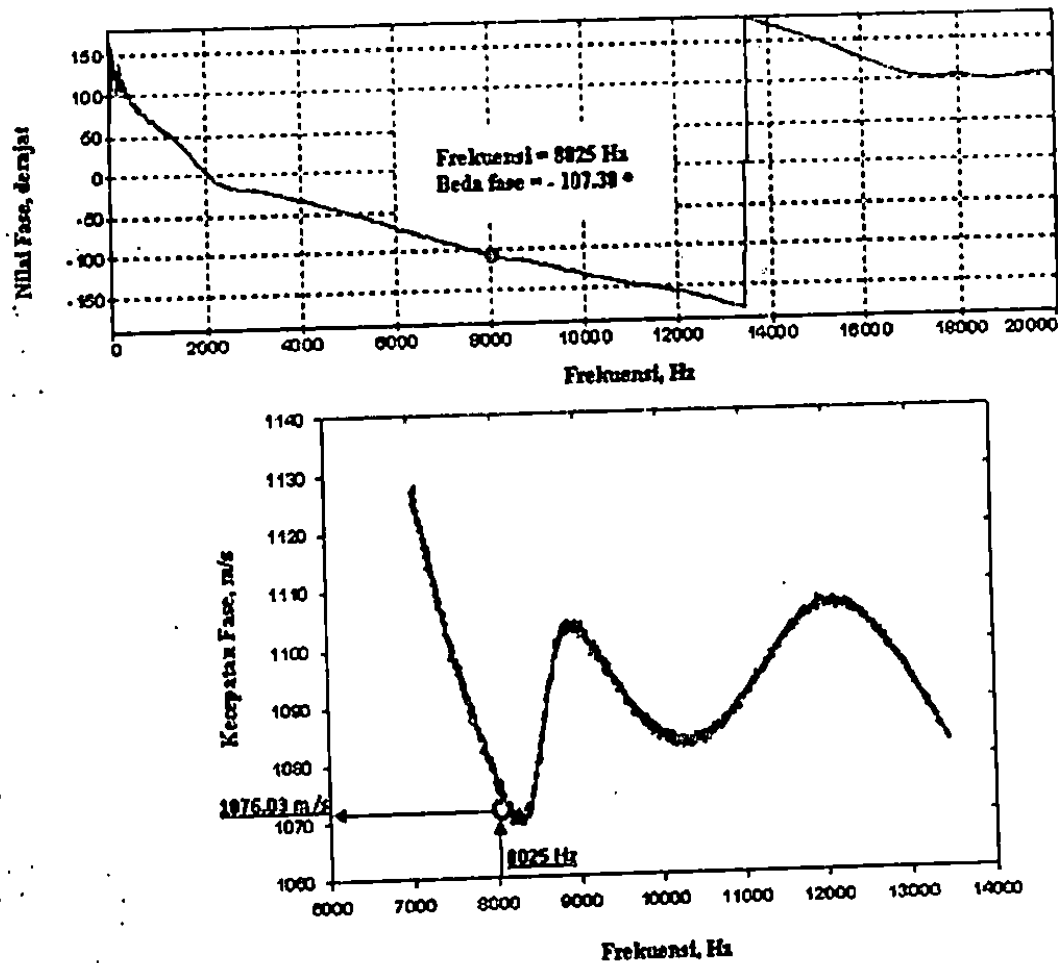


(b) Setelah Proses IRF

Gambar 5.76 Hasil akhir kurva dispersi dari proses IRF

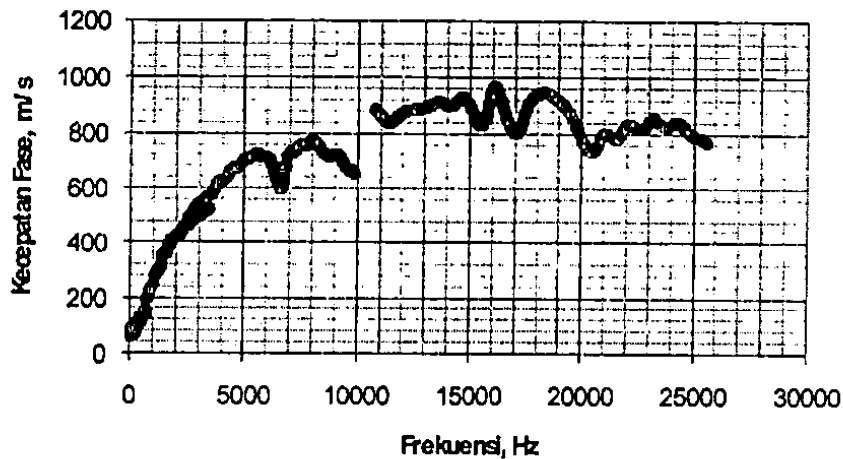
F. Analisis Kecepatan Fase Gelombang pada Perkerasan

Melalui data beda fase pada setiap frekuensi gelombang dalam spektrum fase dan konfigurasi pengukuran dalam parameter jarak antar sensor diperoleh nilai kecepatan gelombang fase dengan menggunakan Persamaan (2.76) hingga (2.79). Contoh analisis kecepatan gelombang fase diberikan dalam Gambar 5.78 untuk rekonstruksi spektrum fase hasil pengukuran 3 cm (Gambar 5.68).



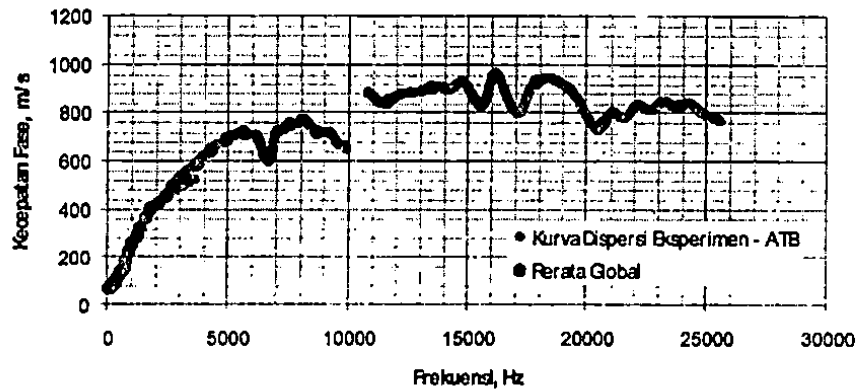
Gambar 5.78 Analisis kecepatan fase untuk jarak sensor 3 cm

Dari Gambar 5.18, ditunjukkan bahwa, salah satu titik data fase diperoleh untuk frekuensi 8025 Hz yaitu 107.38° , selanjutnya nilai kecepatan fase gelombang yang merambat di antara dua sensor yang dihasilkan, yaitu sebesar 1076.03 m/s. Dengan cara yang sama, dilakukan perhitungan untuk titik-titik frekuensi lainnya dan demikian juga untuk jarak sensor 6, 12, 48, 60 dan 100 cm. Kumpulan data kecepatan fase gelombang melawan frekuensi sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.78 menunjukkan corak sebaran kecepatan fase gelombang yang selanjutnya dikenali sebagai kurva sebaran eksperimen individu (*individual experimental dispersion curve*), sedangkan gabung dari



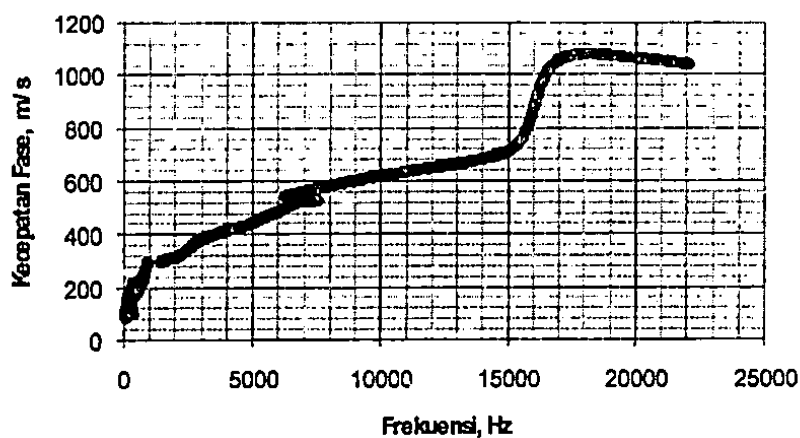
Gambar 5.79 Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk model ATB

Seluruh konfigurasi dalam satu titik pengukuran tersebut digunakan untuk merangkai data penyebaran kecepatan fase (kelompok gelombang R) pada perkerasan jalan yang dimaksudkan dapat mendeteksi lapisan perkerasan dari lapisan permukaan hingga ke tanah dasar (Gambar 5.79) untuk model perkerasan jalan tipe ATB lapisan permukaan 3 cm. Data untuk lapisan permukaan diperoleh dari pengukuran pada jarak 3 hingga 6 cm, sedangkan untuk lapisan fondasi dari data pengukuran 12 hingga 60 cm, dan lapisan tanah dasar menggunakan data dari pengukuran 60 hingga 100 cm. Dari Gambar 5.79 terlihat bahwa lapisan permukaan aspal memiliki nilai kecepatan fase yang tinggi (800 – 1000 m/s), hal ini mengindikasikan bahwa lapisan kaku akan menghasilkan nilai perambatan gelombang yang lebih cepat. Sejalan dengan penurunan kekakuan lapisan maka nilai kecepatan fasenya akan semakin mengecil sebagaimana model profil perkerasan yang tersusun dari lapisan aspal sebagai lapisan kaku selanjutnya diikuti lapisan fondasi dan tanah dasar yang memiliki nilai kekakuan yang lebih rendah. Lapisan fondasi perkerasan jalan dalam batas 300 – 500 m/s dan lapisan tanah dasar pada 100 – 300 m/s.

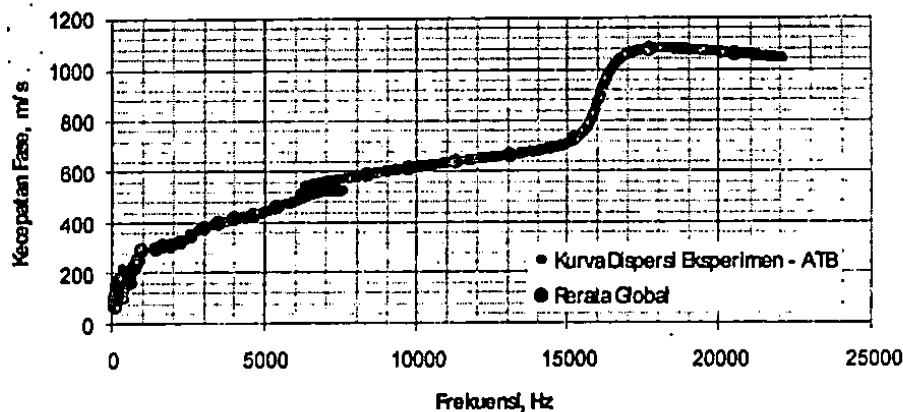


Gambar 5.80 Data rerata global kurva sebaran eksperimen untuk model ATB

Trend kurva dispersi eksperimen yang hampir sama juga diperlihatkan dari penggambaran kecepatan fase melawan frekuensi untuk model perkerasan AC. Kurva data berfrekuensi tinggi dengan kecepatan fase tinggi dihasilkan sebagai perambatan gelombang R pada lapisan permukaan AC, sedangkan semakin rendah frekuensi, maka nilai kecepatan fase menjadi menurun sejalan dengan penurunan kekakuan bahan lapisan perkerasan dari lapisan fondasi kepada lapisan tanah dasar.



Gambar 5.81 Kurva sebaran eksperimen sebaran frekuensi untuk model AC

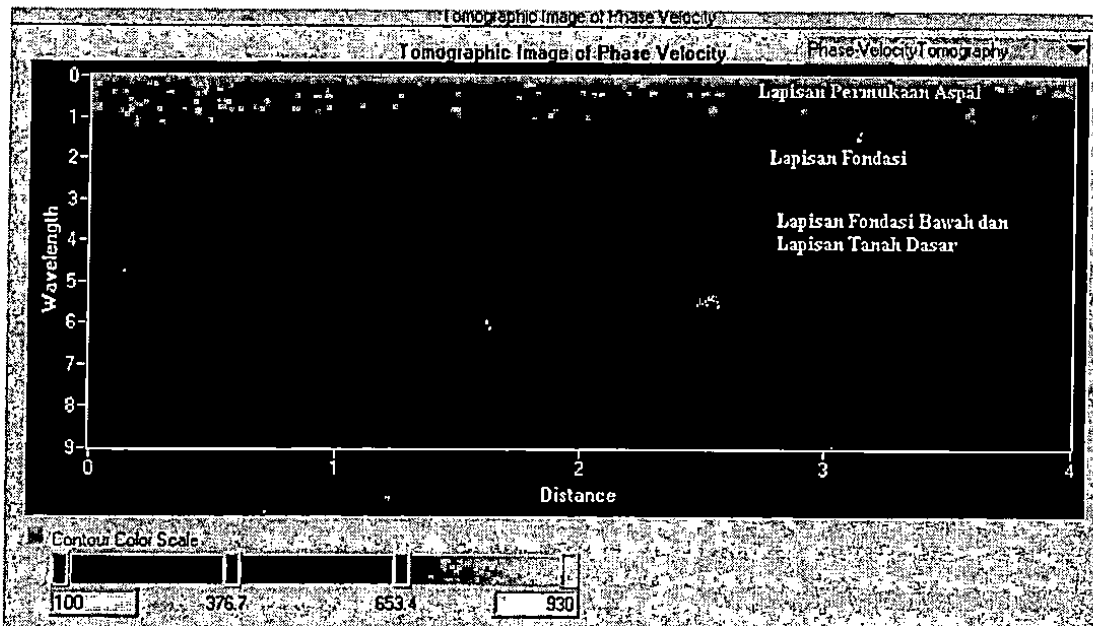


Gambar 5.82 Data rerata global kurva sebaran eksperimen untuk model AC

Dari kurva dispersi eksperimen, selanjutnya dilakukan analisis rerata data untuk input proses inversi selanjutnya. Gambar 5.80 dan 5.82 menunjukkan hasil analisis perataan global untuk memilih segmen data kurva menjadi 40 hingga 50 data pada model ATB (Gambar 5.79) dan AC (Gambar 5.81). Data rata-rata global dari kurva penyebaran fase ini selanjutnya dapat dianalisis untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser dan kedalaman menggunakan metode matrik kekakuan 2 D dan 3 D.

Informasi yang terdapat dalam kurva dispersi sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.79 dan 5.81 di atas sebenarnya telah menampilkan suatu profil perkerasan jalan dalam parameter kecepatan fase yang representative dari nilai kekakuan bahan atau dikenal sebagai parameter dinamik kekakuan bahan. Parameter panjang gelombang sendiri atau frekuensi merupakan parameter penting untuk sebagai fungsi dari penetrasi gelombang yang direpresentasikan sebagai fungsi kedalaman. Suatu analisis tomografi telah dilakukan dalam penelitian ini untuk lebih menjelaskan keterangan di atas. Gambar 5.83 menunjukkan distribusi kecepatan fase yang merupakan parameter ukur dari panjang gelombang dan analisis tomografinya untuk beberapa meter jarak dari sumber gelombang. Gambar 5.83 menunjukkan informasi tomografi profil model perkerasan ATB yang dengan mudah dibedakan per lapisan melalui spektrum warnanya dari lapisan permukaan hingga lapisan tanah dasar. Lapisan merah (atas) merupakan lapisan permukaan aspal yang memiliki nilai kecepatan fase tertinggi atau terkaku, dengan demikian lapisan permukaan perkerasan dapat dikatakan memiliki modulus elastisitas tertinggi dari profil model. Selanjutnya warna biru (lapisan kedua) merupakan lapisan

agregat bawah yang bercampur dengan lapisan subgrade. Pada kedua lapisan ini spektrum sukar membedakan karena kedua lapisan memiliki nilai kecepatan fase yang relatif sama.



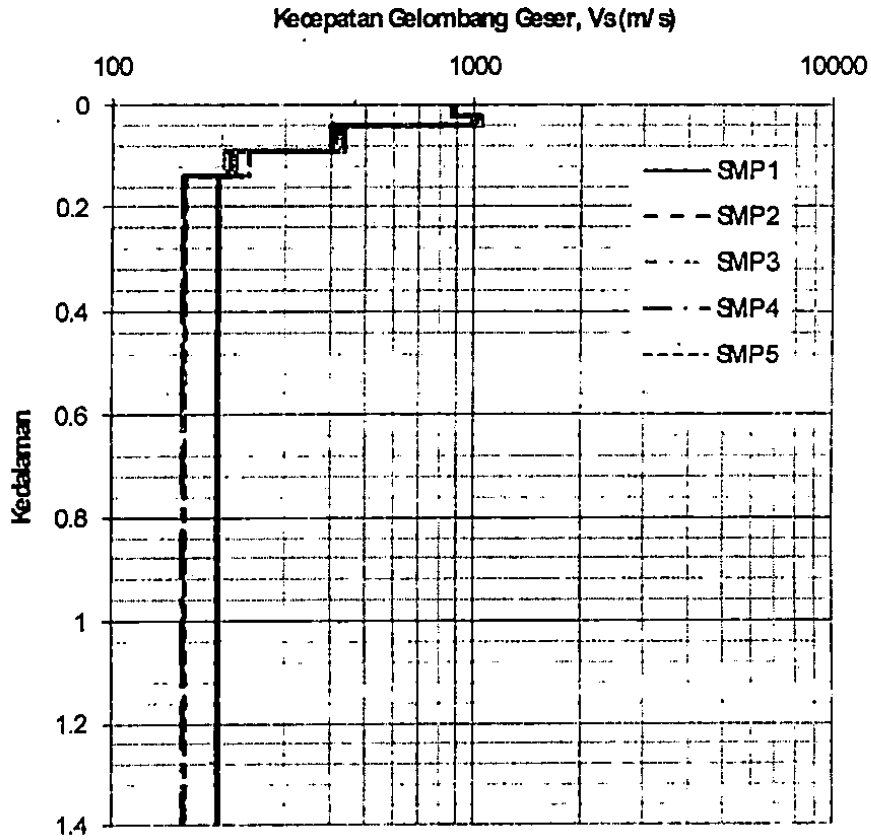
Gambar 5.83 Analisis tomografi terhadap kurva sebaran eksperimen untuk model ATB

Dari analisis di atas membuktikan kemampuan teknik seismik untuk menganalisis profil perkerasan dalam parameter nilai kekakuan bahan dan kedalaman. Suatu analisis inversi selanjutnya perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil profil yang langsung dapat menunjukkan nilai modulus elastisitas profil perkerasan, kedalaman dan beberapa parameter dinamik lainnya yang diusulkan dalam penelitian ini. Penjelasan dan hasil analisisnya diberikan pada bagian berikut ini.

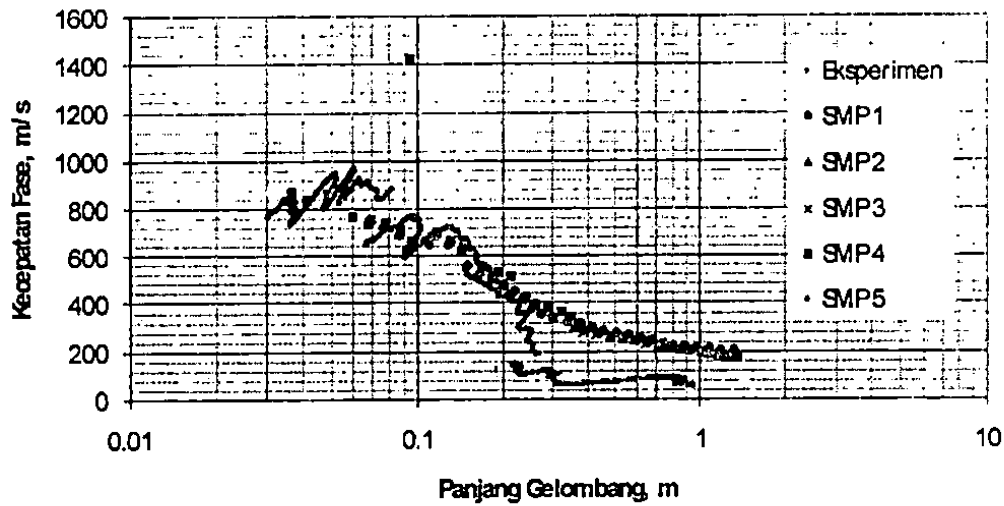
G. Hasil Inversi Profil Model Perkerasan Jalan

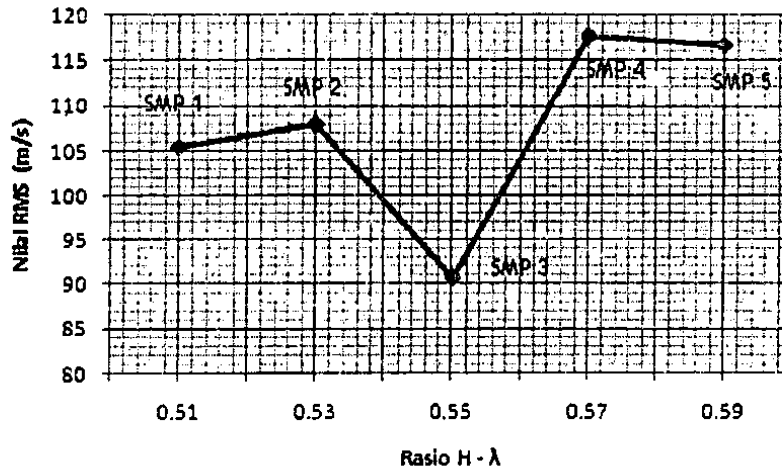
Kurva dispersi dari proses pengukuran eksperimen selanjutnya dianalisis melalui proses inverse menggunakan pendekatan matrik kekakuan dinamik bahan 3 D untuk mendapatkan profil perkerasan model perkerasan jalan. Sebagaimana dijelaskan di bagian simulasi model 2 D dan 3 D, bahwa untuk profil perkerasan jalan, penggunaan model matrik kekakuan 3 D lebih baik dan tepat.

Suatu asumsi profil model perkerasan perlu disusun terlebih dahulu. Dalam analisis ini, suatu profil awal disusun dalam 8 lapisan. Lapisan pertama dan kedua mewakili lapisan permukaan jalan, sedangkan lapisan ketiga hingga keenam merupakan lapisan fondasi jalan yang diletakkan di atas lapisan tanah dasar yang direpresentasikan dalam lapisan ketujuh dan lapisan tak terhingga (half-space). Selain informasi lapisan, parameter bahan seperti kecepatan gelombang geser (dalam unit m/s), rasio Poisson, berat volume bahan (dalam unit kg/m^3) dan rasio pelemahan perlu diasumsi. Untuk menjaga proses simulasi berjalan dengan cepat, asumsi nilai parameter tersebut sebaiknya mendekati nilai yang sebenarnya atau jika memungkinkan berdasarkan informasi pengujian laboratorium. Dalam penelitian ini, nilai asumsi parameter tersebut diperoleh dari beberapa hasil pengujian laboratorium (berat volume bahan) dan hasil kajian oleh Rosyidi (2004) yang menetapkan beberapa nilai asumsi pemodelan dinamik untuk bahan perkerasan jalan. Selanjutnya model kedepan (forward modeling) berbasis matrik kekakuan 3 D dijalankan guna mendapatkan profil SMP dengan mengvariasikan nilai rasio kedalaman dan panjang gelombang ($H-\lambda$). Dalam studi ini, rasio yang digunakan adalah 0.51 hingga 0.59. Rasio $H-\lambda$ yang dicari adalah yang memiliki nilai kesalahan RMS terendah terhadap kurva dispersi eksperimen. Gambar 5.84 menunjukkan hasil analisis SMP untuk model pekerasan jenis ATB. Pada kelima profil SMP yang ditunjukkan tidak terlihat adanya perbedaan yang signifikan. Perbedaan hanya bisa dilihat dari hasil kurva dispersi yang disimulasikan berdasarkan rasio $H-\lambda$. Gambar 5.85 menunjukkan proses fitting dari kurva teori profil SMP hingga mendapatkan nilai RMS terendah. Dari kelima profil SMP tersebut, SMP ke-3 memiliki nilai RMS terendah yaitu



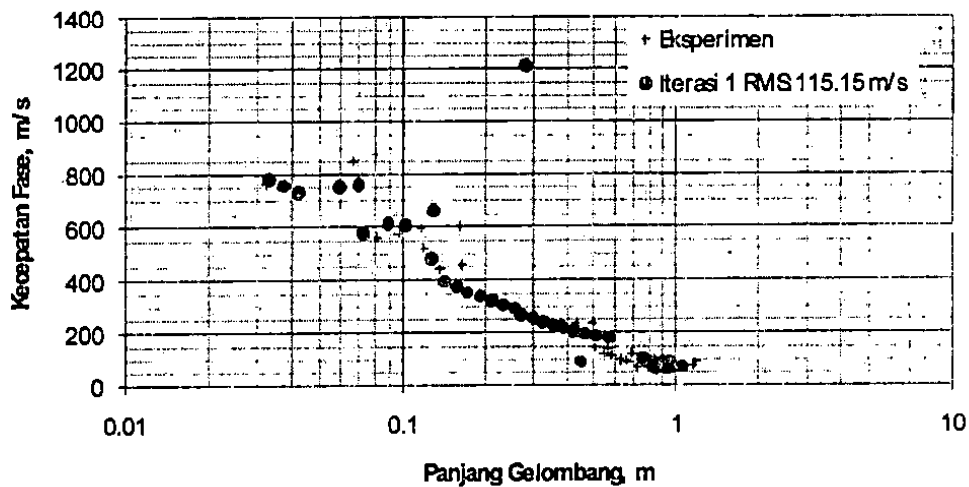
Gambar 5.84 Profil SMP yang diperoleh dari beberapa variasi rasio $H-\lambda$



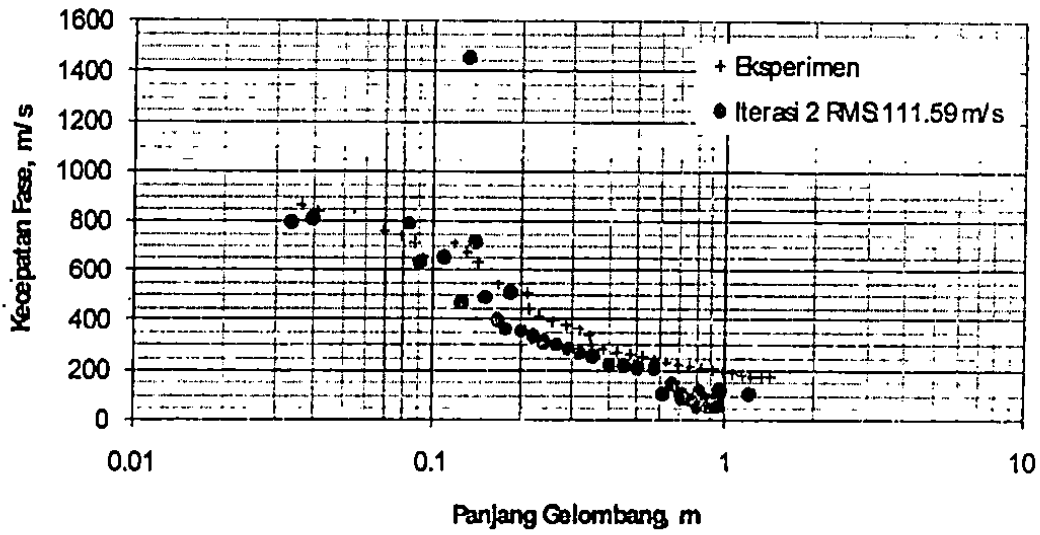


Gambar 5.86 Profil SMP berdasarkan variasi rasio $H - \lambda$ dan nilai RMS yang dihasilkan

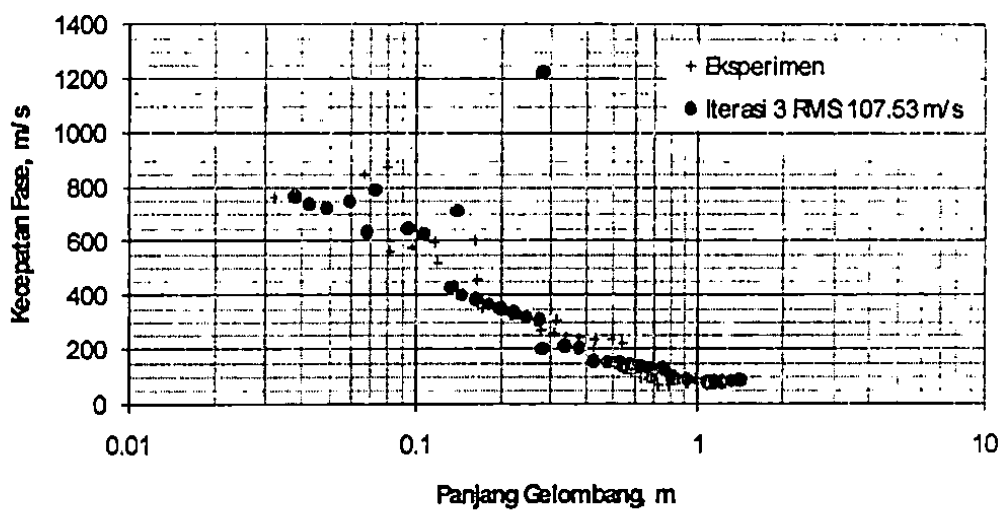
Gambar 5.87 hingga Gambar 5.92 menunjukkan proses iterasi yang dijalankan dalam analisis inversi. Kurva teori dan profil SMP ketiga dijadikan basis model. Algoritma kemiripan maksimum atau maximum likelihood digunakan dalam proses optimasi ini. Alur optimasi telah dijelaskan dalam Gambar 4.11 dan Persamaan 4.23 hingga 4.28



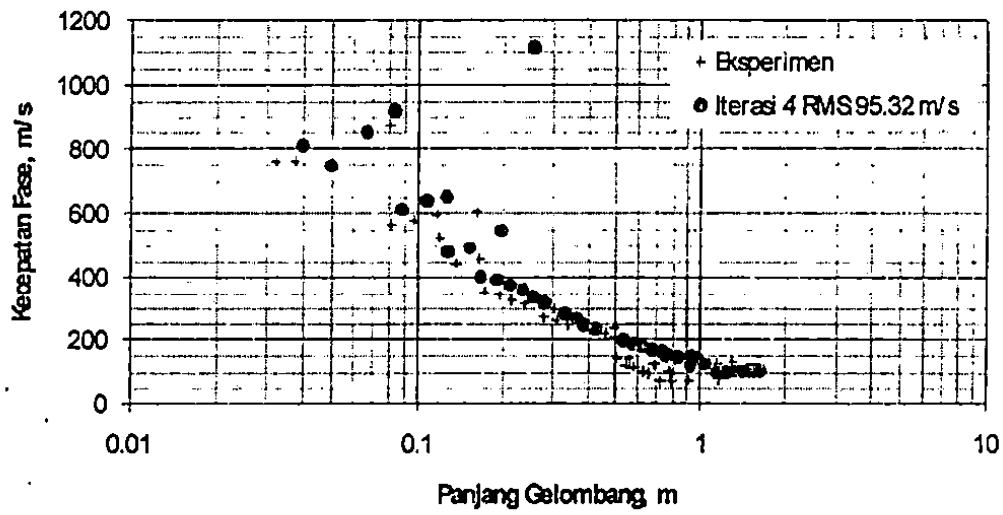
Gambar 5.87 Kurva dispersi teori hasil iterasi 1 terhadap kurva eksperimen



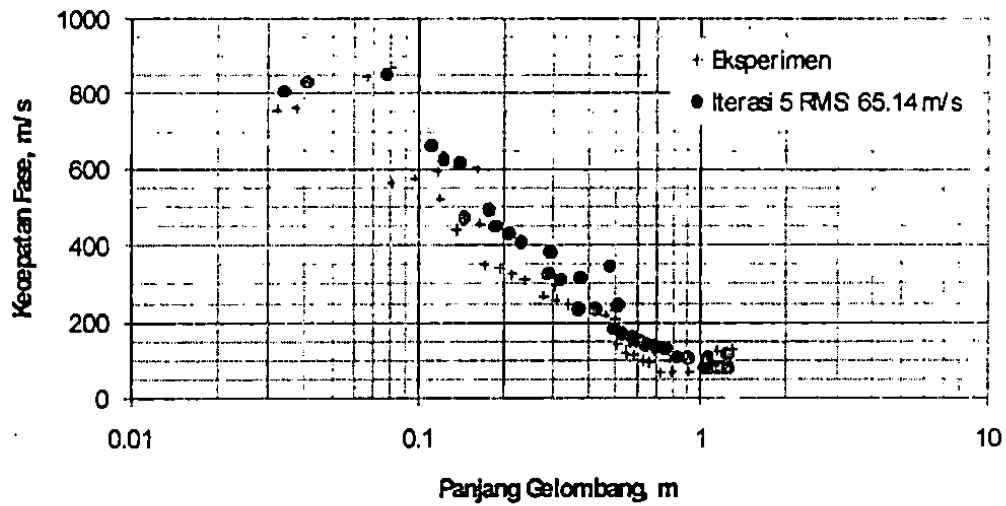
Gambar 5.88 Kurva dispersi teori hasil iterasi 2 terhadap kurva eksperimen



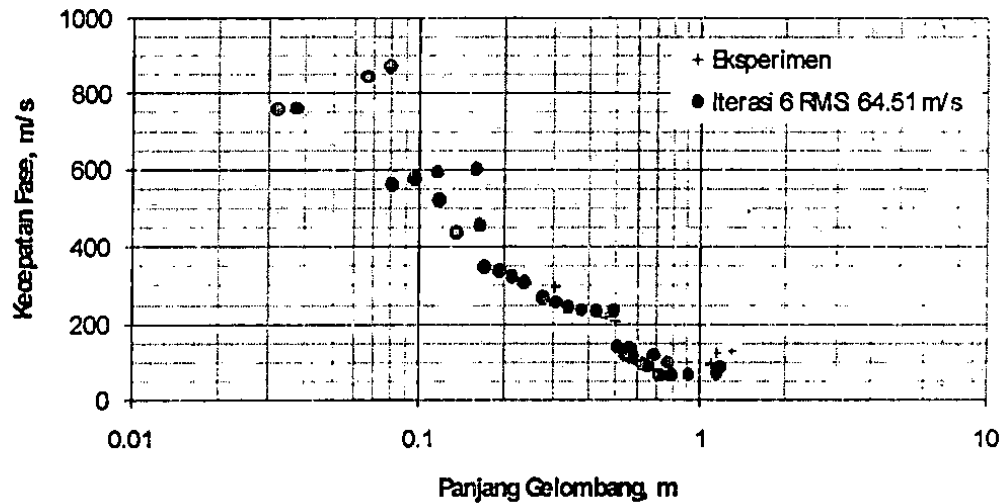
Gambar 5.89 Kurva dispersi teori hasil iterasi 3 terhadap kurva eksperimen



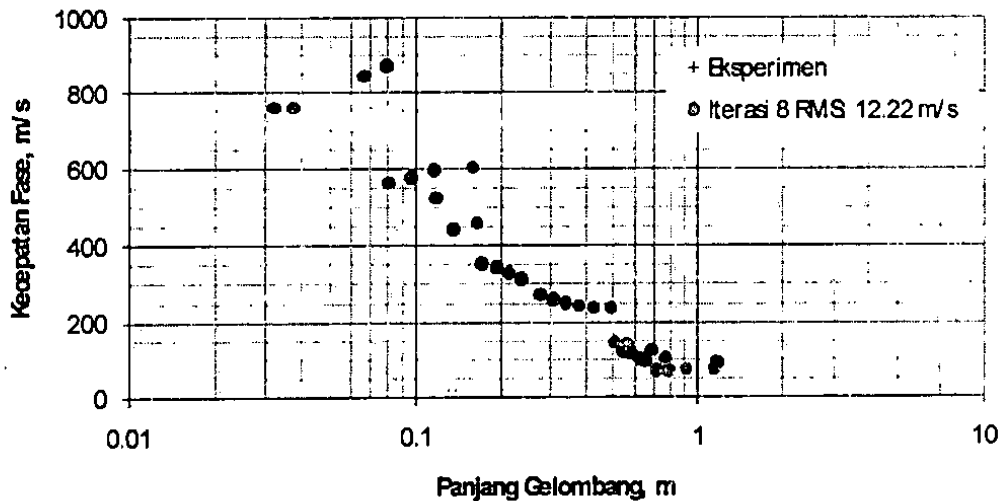
Gambar 5.90 Kurva dispersi teori hasil iterasi 4 terhadap kurva eksperimen



Gambar 5.91 Kurva dispersi teori hasil iterasi 5 terhadap kurva eksperimen



Gambar 5.92 Kurva dispersi teori hasil iterasi 6 terhadap kurva eksperimen

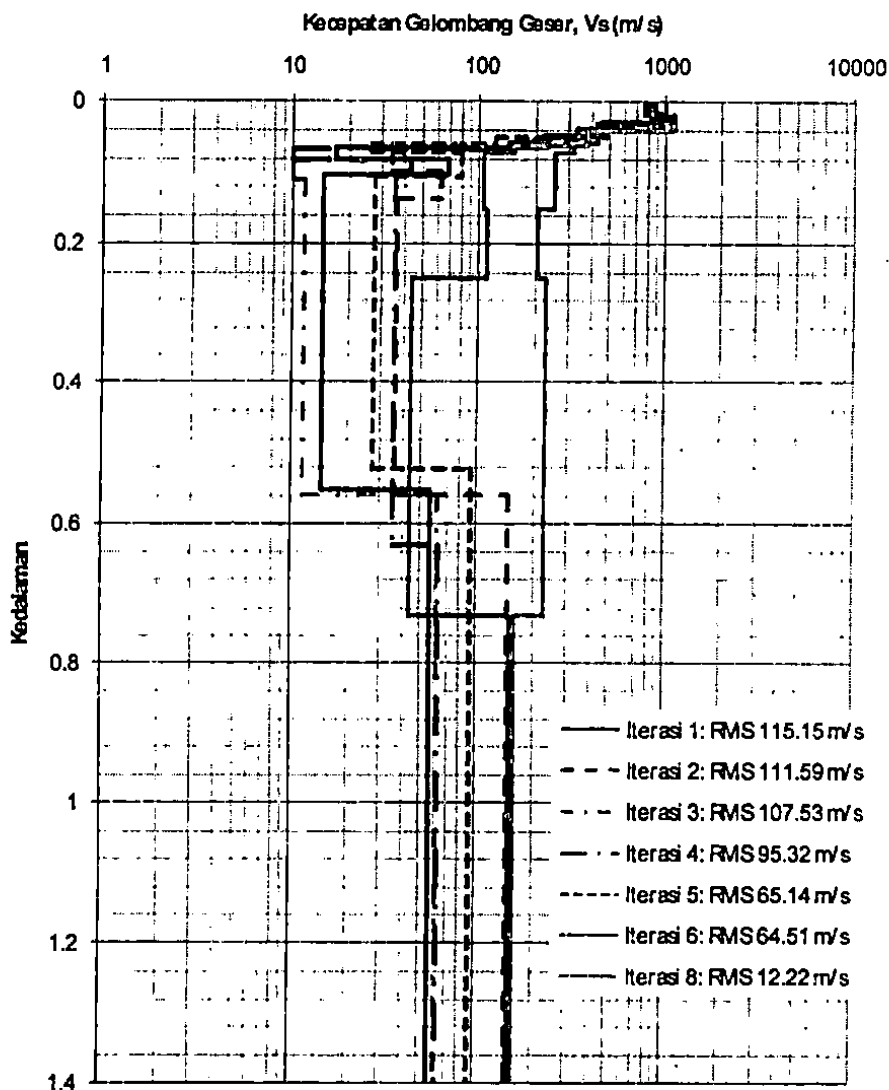


Gambar 5.93 Kurva dispersi teori hasil iterasi 8 terhadap kurva eksperimen

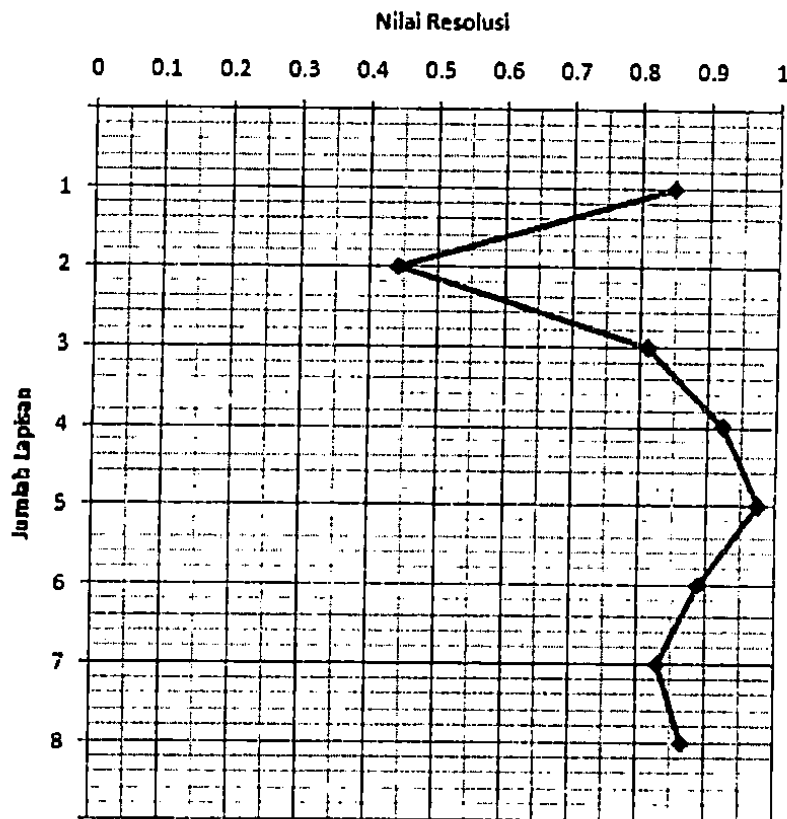
Setelah dilakukan iterasi hingga kedelapan, diperoleh padanan yang cukup baik antara kurva dispersi teori terhadap kurva eksperimen pada model ATB (Gambar 5.93). Hasil kesalahan RMS dihitung sebesar 12.22 m/s. Meskipun tidak dapat hasil padanan sehingga meminimumkan kesalahan di bawah 5 m/s, namun hasil ini sudah menunjukkan nilai yang baik. Dengan nilai simpangan standar (standard deviation, SD) pada kurva dispersi 246.53

Mengingat kurva dispersi untuk perkerasan bersifat menyebar maka kesalahan tersebut sudah termasuk pencapaian optimasi yang baik.

Profil kecepatan gelombang geser untuk model perkerasan ATB yang merupakan hasil dari proses inversi ditunjukkan dalam Gambar 5.94. Beberapa profil kecepatan gelombang geser juga ditunjukkan. Pemilihan profil kedelapan untuk hasil akhir analisis inversi ini juga mempertimbangkan hasil resolusi yang didapatkan dalam analisis. Gambar 5.95 menunjukkan hasil resolusi profil kedelapan. Keseluruhan lapisan yang digunakan dalam pemodelan memiliki nilai resolusi di atas 0.1, yang berarti suatu nilai yang diterima untuk mengesahkan padanan resolusi lapisan terhadap padanan kurva teori dan kurva eksperimen.



Gambar 5.94. Perbandingan profil kecepatan gelombang geser hasil analisis inversi untuk



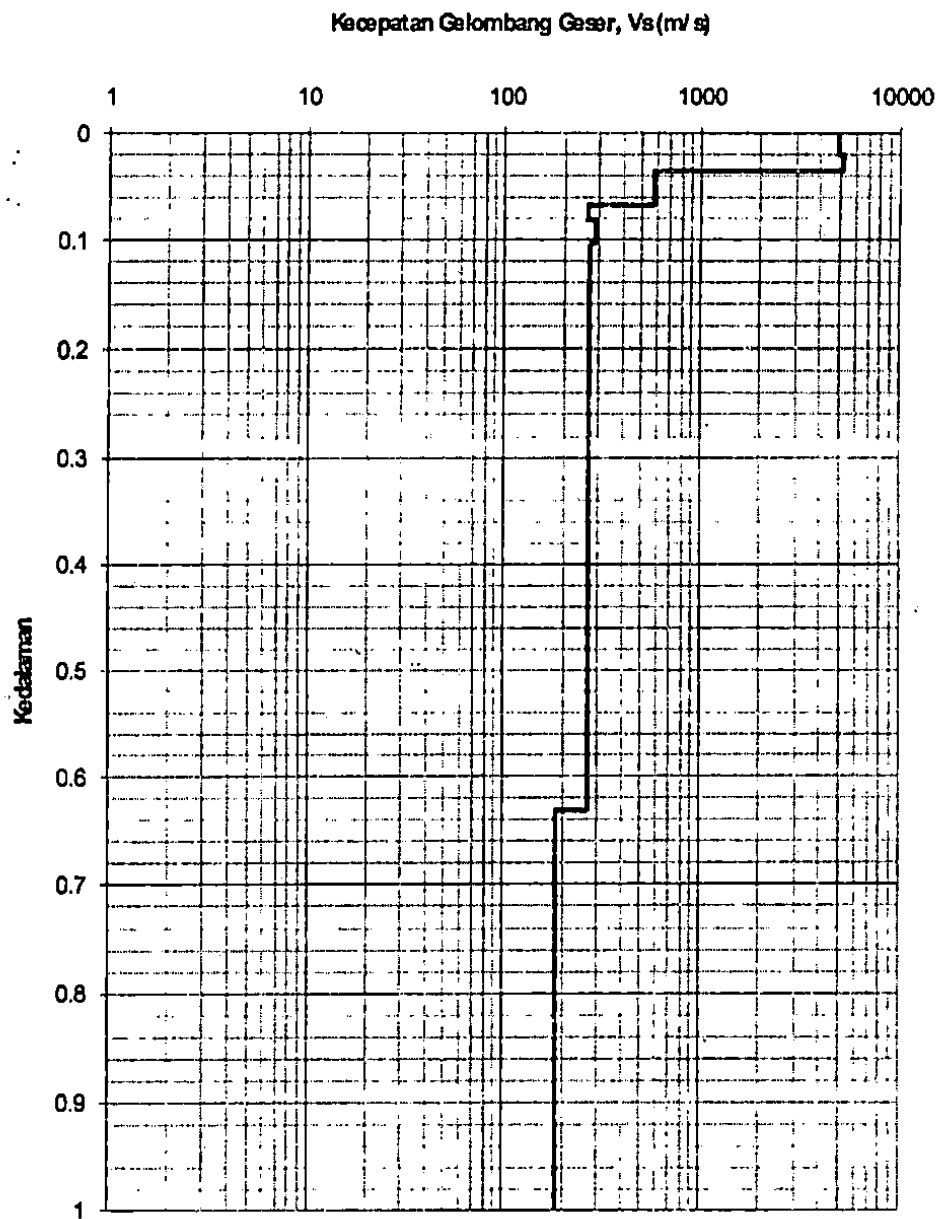
Gambar 5.95. Hasil resolusi analisis inverse untuk profil kedelapan model ATB

Menggunakan Persamaan 2.81, modulus elastisitas setiap lapisan model dapat ditentukan dari nilai kecepatan gelombang gesernya. Modulus elastisitas ditentukan berdasarkan nilai rasio Poisson yang diasumsikan dan berat unit setiap lapisan yang digunakan dalam inversi. Pada penelitian ini, berat unit setiap lapisan didapatkan dari hasil pengujian laboratorium yang dilaksanakan sedangkan untuk nilai rasio Poisson digunakan nilai 0,25 untuk aspal dan 0,33 untuk bahan lapisan lainnya (Nazarian, 1984). Hasil perhitungan modulus elastisitas bahan lapisan model perkerasan jalan jenis ATB diberikan pada Tabel 5.17.

Tabel 5.17 Hasil perhitungan modulus elastisitas profil model ATB

Jenis Lapisan	Kecepatan Gelombang Geser (m/s)	Modulus Elastisitas (MPa)
Lapisan Permukaan	1003.42	6158.23
Lapisan Fondasi	348.71	623.36
Lapisan Fondasi Bawah	283.13	388.15
Lapisan Tanah Dasar	192.49	183.68

Dengan metode yang sama diperoleh profil akhir untuk model perkerasan AC sebagaimana diberikan dalam Gambar 5.96 dan nilai modulus elastisitas diberikan dalam Tabel 5.18.



Gambar 5.96 Profil kecepatan gelombang geser untuk model perkerasan AC

Tabel 5.18 Hasil perhitungan modulus elastisitas profil model AC

Jenis Lapisan	Kecepatan Gelombang Geser (m/s)	Modulus Elastisitas (MPa)
Lapisan Permukaan	908.19	5045.95
Lapisan Fondasi	335.567	573.93
Lapisan Fondasi Bawah	234.02	265.18
Lapisan Tanah Dasar	220.75	238.19

H. Perbandingan Hasil SASW terhadap Pengujian Laboratorium dan Analisis Parameter

Dalam bagian ini, studi komparasi dilakukan terhadap hasil profil modulus elastisitas yang diperoleh dari pengujian SASW terhadap model perkerasan jalan baik jenis ATB maupun AC. Hasil pengujian laboratorium digunakan sebagai parameter pembandingan untuk mengetahui ketepatan sensoran perilaku kekakuan bahan, keabsahan profil yang dihasilkan dan mengetahui kondisi dan parameter yang mempengaruhi pengukuran. Komparasi perilaku kekakuan bahan dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran modulus resilien aspal terhadap modulus elastisitas hasil SASW. Untuk lapisan fondasi dan tanah dasar, modulus elastisitas dapat ditentukan melalui persamaan empirik prediksi yang dikeluarkan oleh Shell (1978). Penjelasan mengenai persamaan empirik ini telah diberikan pada bagian sebelum ini. Analisis keabsahan profil dilakukan dengan membandingkan profil perkerasan yang dihasilkan melalui pengujian SASW terutama pada ketebalan lapisan yang bisa dideteksi terhadap ketebalan lapisan perkerasan model yang terkontrol. Terakhir, parameter penentu dalam pengukuran turut dibahas, yaitu parameter suhu lapangan dan reologi bahan.

1. Perbandingan Modulus Elastisitas

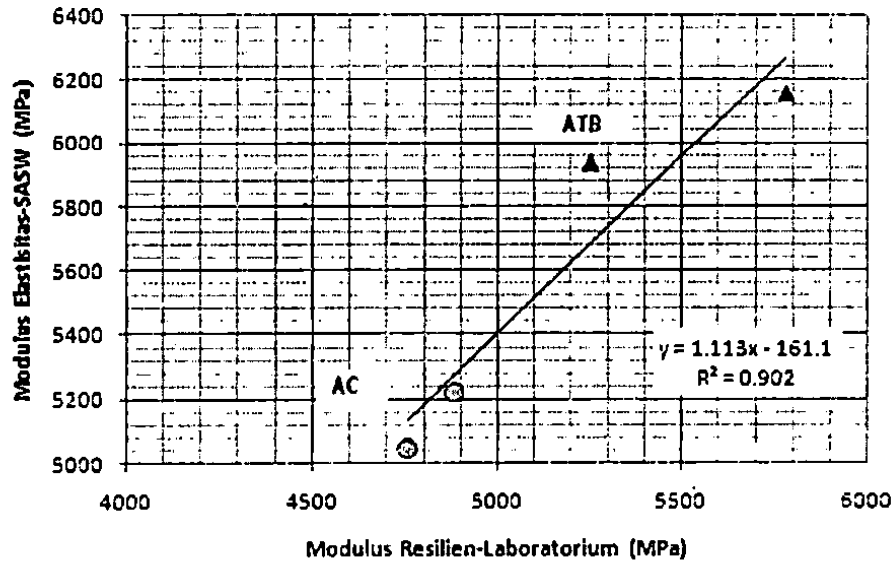
Modulus elastisitas bahan lapisan permukaan aspal yang digunakan dalam model diperoleh melalui pengujian modulus resilien menggunakan alat UTM. Secara umum, hasil pengujian telah disampaikan pada Tabel 5.12. Kesimpulan nilai rata-rata dari lapisan permukaan jenis

Tabel 5.19 Kesimpulan hasil pemeriksaan modulus resilien (M_R)

No	Sampel	Temperatur (°C)	Modulus Elastisitas (MPa)	Modulus Elastisitas Rata-Rata (MPa)
1	AC-1	25	4757	4818
2	AC-2	25	4879	
3	ATB-1	25	5781	5516.5
4	ATB-3	25	5252	

Tabel 5.12 menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas untuk jenis ATB lebih tinggi dibandingkan nilai modulus jenis AC. Hal ini disebabkan oleh campuran ATB yang digunakan dalam model ini memiliki nilai struktural (kekuatan) yang lebih baik. Kondisi ini dipengaruhi oleh formulasi campuran agregat yang digunakan. Hasil ini diperkuat dengan hasil pengujian stabilitas Marshall yang dilakukan terhadap kedua jenis perkerasan tersebut. Sebagaimana telah diberikan dalam Tabel 5.10 bahwa nilai stabilitas ATB sebesar 1905 kg, sedangkan untuk AC terukur sebesar 1298 kg.

Pengujian modulus resilien dilakukan pada suhu 25° C yaitu suhu ruang dimana tidak terjadi perubahan mol pada aspal yang signifikan. Pengujian SASW sendiri dilakukan di lapangan dengan suhu lapangan saat observasi adalah 29 ± 1 ° C. Gambar 5.97 menunjukkan perbandingan antara nilai modulus elastisitas dari hasil pengujian laboratorium dan SASW.

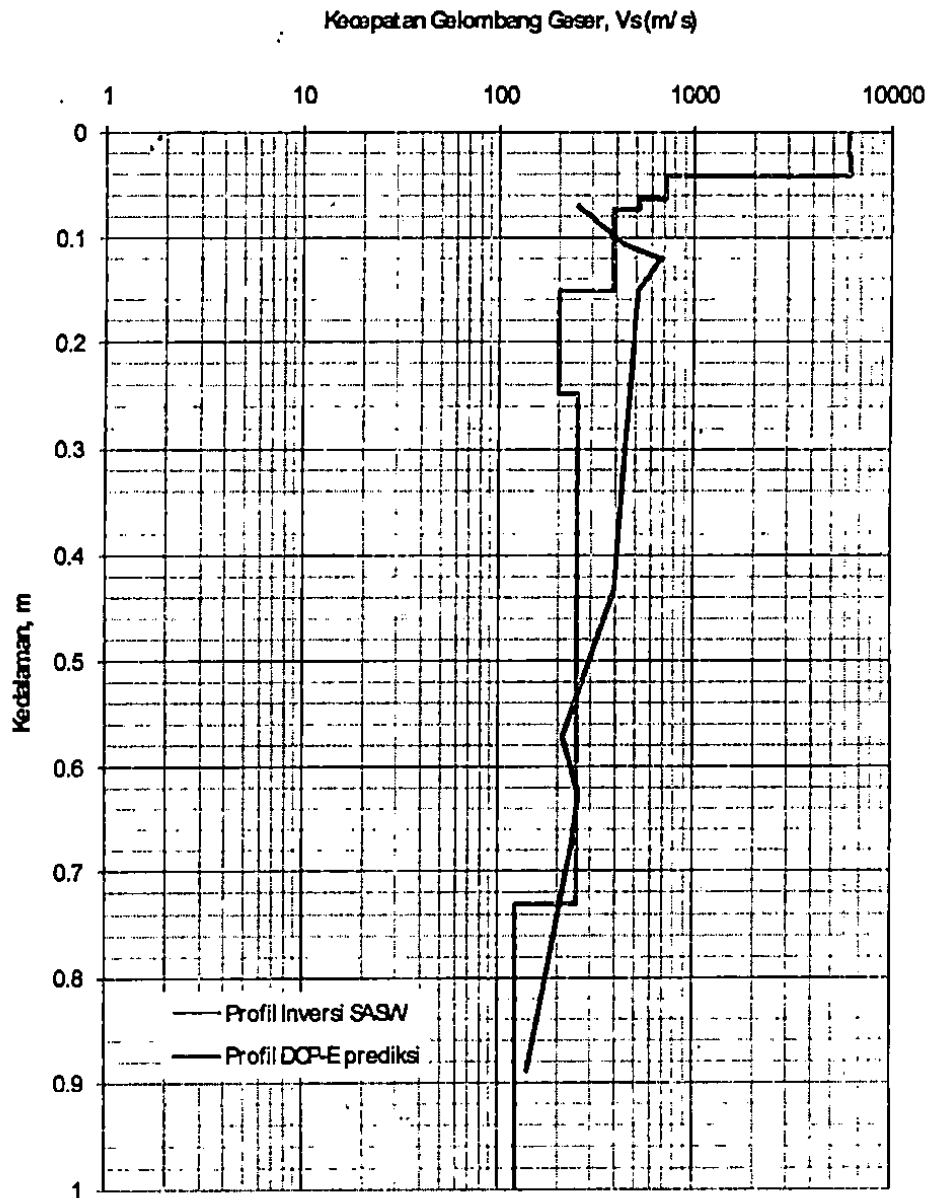


Gambar 5.97 Perbandingan nilai modulus elastisitas dari pengujian UTM dan SASW

Modulus elastisitas hasil pengujian SASW memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan

perbedaan tingkat regangan bahan dari kedua pengujian ini. Pada pengujian modulus resilien, beban yang digunakan adalah beban impuls yang memiliki nilai regangan bahan akibat pembebanan yang disesuaikan dengan kondisi pembebanan lalu lintas (sebesar $45.78 \mu\epsilon$ sebagaimana disebutkan dalam Tabel 5.11). Untuk pengujian SASW, kondisi regangan bahan akibat pembebanan dinamik relative sangat kecil (0.001 % hasil pengukuran oleh Rössset et al., 1990), karena perambatan gelombang yang dihasilkan memiliki frekuensi tinggi dan dihasilkan dari hentaman atau jatuhan bebas bola baja. Energi impuls yang dirambatkan sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi atau tidak memberikan deformasi elastik yang berarti pada bahan. Kondisi ini disebutkan sebagai kondisi elastik linier. Untuk pembebanan modulus resilien adalah pembebanan dengan kondisi bahan berperilaku sebagai elastik non-linear dan visko-elastik.. Pembahasan mengenai perilaku elastik ini diberikan pada pembahasan mengenai reologi bahan pada bagian di bawah. Secara umum, hasil modulus elastisitas dari pengujian SASW juga menunjukkan bahwa kekakuan bahan asfal masih memiliki nilai yang sesuai atau termasuk dalam wilayah modulus elastik dinamik bahan untuk aspal pada suhu $\pm 70^\circ \text{F}$ ($LF > 16 \text{ Hz}$) sebesar $5 - 11 \times 10^5 \text{ Psi}$ atau $3450 - 7590 \text{ MPa}$ (Huang 1993). Nilainya juga bersesuaian terhadap pengujian SASW yang dilakukan oleh Nazarian (1984) dan Yuan et al. (1999) yaitu dalam wilayah 1400 hingga 7700 MPa. Kesimpulan lain yang bisa diperoleh dari Gambar 5.97 adalah modulus elastisitas hasil pengujian SASW berkorelasi linier dan positif terhadap perbedaan nilai kekerasan atau kekakuan bahan. Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa nilai stabilitas lapisan perkerasan ATB lebih tinggi dibandingkan dengan jenis AC. Hal ini juga disimpulkan sama oleh pengujian SASW, bahwa nilai modulus elastisitas jenis ATB lebih tinggi dari jenis AC. Dengan demikian, pengujian SASW memiliki keunggulan untuk dapat mengesan perbedaan nilai kekakuan suatu bahan tanpa memberikan kerusakan pada struktur bahan tersebut.

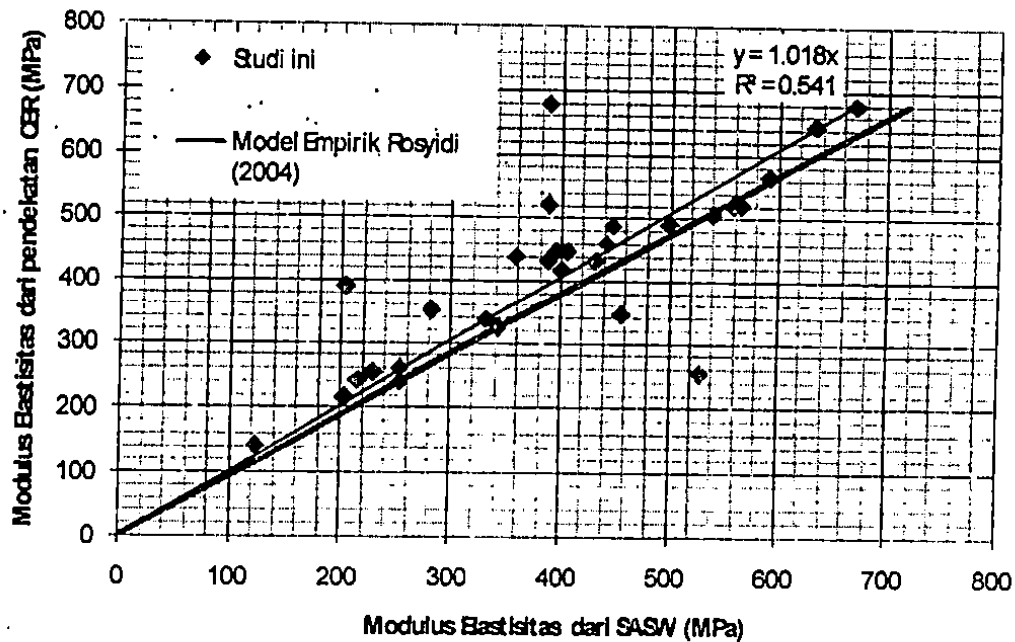
Keadaan tersebut juga berlaku untuk perbedaan kekakuan pada lapisan fondasi dan tanah dasar. Gambar 5.98 menunjukkan perilaku modulus elastisitas pada lapisan fondasi dan tanah dasar yang dapat dideteksi dengan baik oleh pengujian SASW pada salah satu titik pengujian di model perkerasan jalan. Modulus elastisitas kedua lapisan tersebut didapatkan dari pendekatan empirik modulus elastisitas yang biasa digunakan dalam disain jalan raya. Nilai modulus tersebut didapatkan dari korelasi pengujian DCP dan CBR lapangan. Meskipun kedua grafik tidak berpadanan dengan baik, namun trend grafik yang muncul sudah menandakan kepekaan teknik SASW untuk mendeteksi kekakuan bahan bawah



Gambar 5.98 Perbandingan nilai modulus elastisitas dari SASW dan prediksi modulus elastik dari Persamaan Shell (1978)

Untuk mengetahui hubungan kedua parameter hasil ini yaitu modulus elastisitas dari pengujian SASW dan pendekatan empirik DCP-CBR, Gambar 5.99 berikut ini menunjukkan seluruh data investigasi DCP pada lapisan fondasi dan tanah dasar yang dijalankan terhadap pengujian SASW. Secara umum, terdapat trend dan perilaku korelasi positif yang diperoleh dari hubungan ini. Meskipun masih terdapat beberapa data yang menyebar. Hal ini cukup dimengerti karena pada pengujian DCP, nilai kapasitas dukung tanah atau fondasi diperoleh

dalam pengujian dapat diperoleh apabila kerucut menemui kumpulan agregat yang keras dan sebaliknya.



Gambar 5.99 Korelasi modulus elastisitas pengujian SASW terhadap pendekatan modulus dari pengujian DCP-CBR untuk lapisan fondasi dan tanah dasar

Suatu pengujian signifikansi korelasi telah dijalankan untuk mendapatkan kesimpulan hubungan di atas (Gambar 5.99). Dari hubungan data di atas, menggunakan hubungan korelasi Pearson, maka diperoleh nilai r (korelasi Pearson) adalah 0.736. Pengujian signifikansi korelasi dilakukan menggunakan *T-student test*. Dengan hipotesis nol yang disusun menyatakan tiada hubungan antara kedua kelompok data (kelompok data modulus elastik SASW dan modulus elastik DCP) dan demikian sebaliknya, dan nilai $dk = 27$ ($29 - 2$), serta α ditetapkan sebesar 0,05, maka nilai t hitung yang diperoleh adalah 5.641. Nilai t hitung ini dibandingkan dengan t tabel dengan daerah penerimaan $\pm 2,052$. Dengan demikian, hipotesis nol adalah ditolak, yang berarti terdapat hubungan korelasi yang signifikan antara nilai modulus elastisitas hasil pengujian SASW terhadap nilai modulus elastisitas prediksi dari data DCP-CBR. Persamaan regresi yang dihasilkan dari Gambar 5.99, hampir sama atau relatif bersetujuan dengan model empirik yang diusulkan oleh Rosyidi (2004).

2. Perbandingan Profil Tebal Model Perkerasan

Untuk menilai sensitifitas pengujian SASW dalam mendeteksi lapisan permukaan dan fondasi suatu jalan, dilakukan perbandingan antara ketebalan lapisan hasil pengukuran SASW terhadap ketebalan lapisan model terkontrol. Tabel 5.20 menunjukkan hasil perbandingan ketebalan antara pengukuran dan kontrol ketebalan model.

Tabel 5.20. Perbandingan ketebalan lapisan model hasil pengukuran dan pengamatan

Jenis Lapisan	Tebal Lapisan Model	Tebal Lapisan Hasil Pengukuran SASW (cm)	Perbedaan $\frac{(3)-(2)}{(2)}$
(1)	(2)	(3)	(4)
Permukaan	ATB = 3 cm	2.659	-0.037
		2.64	
		3.368	
		Rata-Rata: 2.889	
	ATB = 5 cm	5.838	0.0440
		5.356	
		4.467	
		Rata-Rata: 5.22	
Permukaan	AC = 3 cm	2.724	0.0887
		3.495	
		3.58	
		Rata-Rata: 3.26	
	ATB = 5 cm	5.182	0.0886
		6.275	
		4.873	
		Rata-Rata: 5.44	
Fondasi Terpasang	Agregat = 15 cm	15.101	0.15357
		19.86	
		16.95	
		Rata-Rata: 17.303	
Perbedaan rata-rata			0.06762

Perbedaan ketebalan lapisan antara pengukuran dan model ditemui masih besar yaitu rata-rata 6,76 %. Kondisi ini disebabkan oleh perbedaan antar lapisan perkerasan jalan yang menyebabkan terdapat gelombang bias dan pantulan dalam analisis sinyal gelombang. Meskipun demikian, untuk lapisan perkerasan jalan terutama model ATB, rata-rata perbedaan ketebalan lapisan model ATB masih berada di bawah 0,1%. Untuk lapisan fondasi

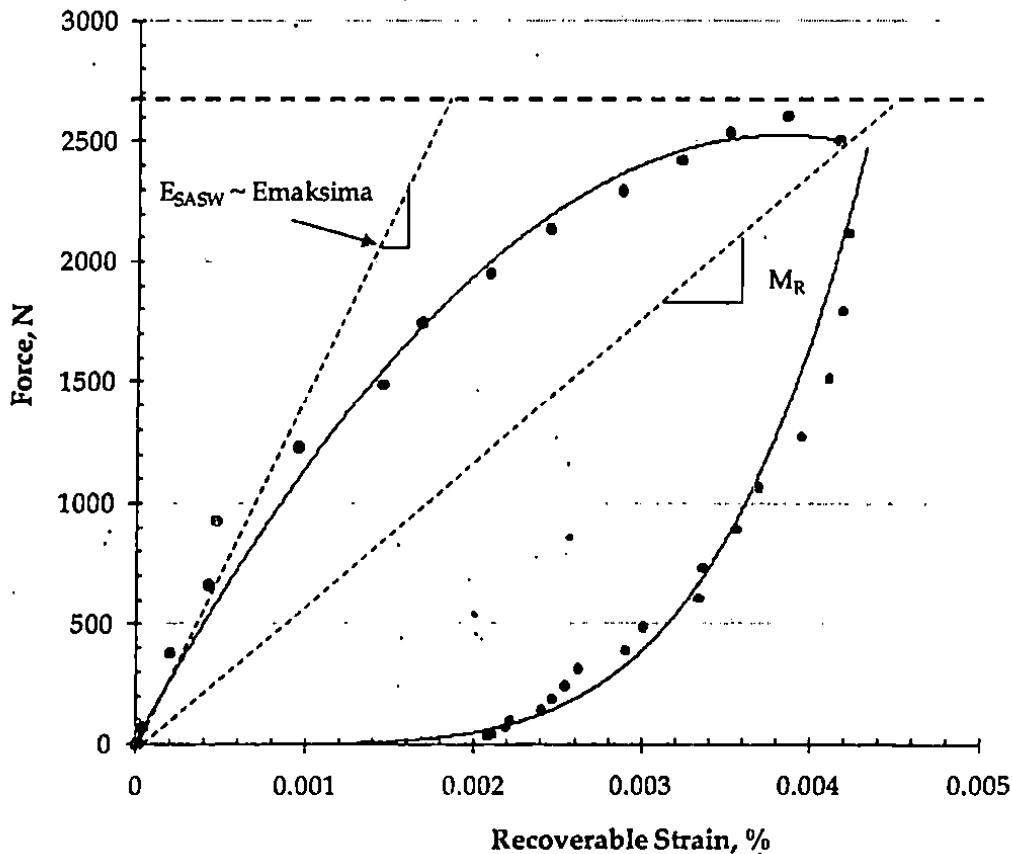
sendiri, perbedaan identifikasi ketebalan lapisan oleh pengukuran SASW masih di atas 15 %. Hal ini disebabkan terdapat kesulitan dalam analisis profil yaitu nilai kekakuan antara lapisan fondasi dan tanah dasar adalah relatif sama.

Secara umumnya, teknik SASW mampu menganalisis profil setiap lapisan pada model perkerasan jalan, meskipun masih terdapat perbedaan yang harus dicari solusinya. Namun teknik ini bisa menjadi rujukan bagi inspektor jalan sebagai instrumen pengawasan terhadap tebal lapisan permukaan perkerasan jalan dengan mempertimbangkan tingkat deviasi ukur 5 hingga 9 % sehingga bisa meminimalisasi pekerjaan pengeboran jalan.

3. Kajian Sifat Reologi Bahan

Untuk konstruksi perkerasan jalan, sifat reologi bahan lebih banyak menumpukan perhatian kepada perilaku tegangan dan regangan bahan akibat pembebanan yang merupakan fungsi waktu dan suhu. Untuk pengamatan sifat reologi bahan terhadap parameter waktu melalui pengujian SASW sangat memungkinkan untuk dilaksanakan, namun dalam tahap penelitian ini, kondisi tersebut tidak bisa dilakukan karena terbatasnya waktu penelitian dan pengaruh tegangan dan regangan akibat waktu tidak bisa diamati dalam periode yang pendek.

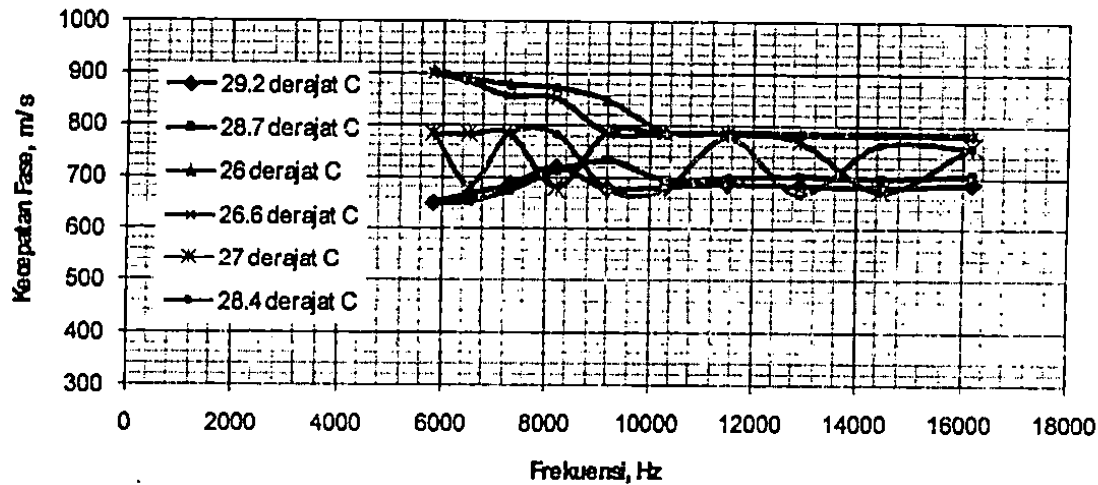
Dalam bagian ini, dibahas mengenai kajian reologi bahan terhadap perilaku bahan akibat pembebanan dinamik gelombang dan impuls. Beban dinamik gelombang merupakan sifat pembebanan dari pengujian SASW sedangkan beban impuls dari pengujian modulus resilien. Hasil kedua pendekatan tersebut diberikan dalam Gambar 5.100. Nilai modulus elastisitas yang diperoleh dari SASW lebih bersesuaian atau mendekati nilai modulus elastisitas maksimum bahan aspal, sedangkan untuk modulus resilien lebih kepada modulus elastik non linear atau sudah mendekati sifat bahan visko-elastik. Amplitudo regangan bahan pada modulus elastik dari pengujian SASW tidak lagi berpengaruh atau nilainya lebih kecil dari 0.001 %. Oleh karena pada regangan ini bahan dikatakan bersifat elastik linier. Sifat regangan modulus resilien yang dihasilkan tidak bersifat kembali sempurna meskipun telah recoverable. Ini karena beban impuls yang diberikan memberikan pendekatan beban dinamik yang lebih besar dibandingkan dengan perambatan gelombang. Dengan demikian, nilai modulus elastik yang dihasilkan oleh pengujian SASW tentunya akan menghasilkan nilai



Gambar 5.100 Hubungan antara force dan recoverable strain pada pendekatan kajian reologi bahan modulus elastisitas dari pengujian SASW dan modulus resilien

Sifat bahan perkerasan yang penting lainnya adalah sifat visko-elastik bahan perkerasan aspal untuk fungsi suhu. Sifat ini terkait dengan perubahan kekakuan bahan terhadap suhu. Bahan perkerasan yang memiliki sifat ini hanyalah lapisan permukaan jalan saja. Konsistensi bahan lapisan fondasi dan tanah dasar tidak dipengaruhi oleh perubahan suhu atau dapat dikatakan sangat minimum. Gambar 5.101 menjelaskan terdapat perubahan nilai kecepatan fase terhadap suhu lingkungan yang mempengaruhi model. Secara umum semakin tinggi suhu lingkungan akan menghasilkan nilai kecepatan fase pada bahan yang semakin berkurang. Meskipun demikian, kecepatan fase sebenarnya tidak memiliki hubungan langsung dengan parameter suhu dalam perhitungannya. Hubungan ini disebabkan oleh perubahan sifat bahan atau modulus elastisitas pada model akibat perubahan suhu lingkungan. Dengan berubahnya nilai modulus pada bahan akan berakibat perubahan pada nilai kecepatan fasenya. Kajian ini perlu dilanjutkan secara lebih mendalam untuk mendapatkan hasil analitik dan mekanistik

yang sesuai. Selain itu, pengaruh perubahan suhu perlu diukur secara analitik sehingga dapat memastikan seberapa besar faktor perubahan suhu mempengaruhi pengukuran SASW.



Gambar 5.101 Pengaruh suhu terhadap kecepatan fase

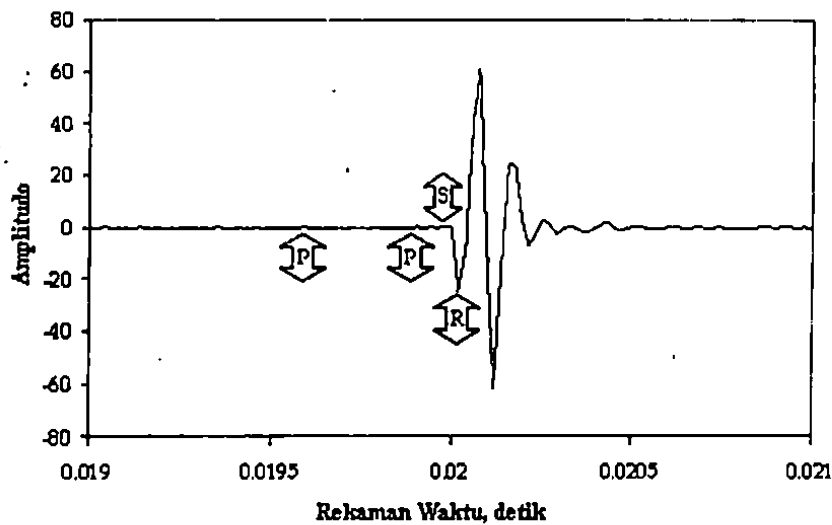
H. Sistem Analisis Terpadu

Selain kemampuannya untuk menganalisis modulus elastisitas. Dalam penelitian ini, suatu sistem analisis terpadu dalam teknik SASW telah diusulkan. Teknik SASW memiliki potensi untuk melakukan analisis parameter dinamik bahan diantaranya koefisien pengurangan tak dipengaruhi frekuensi (*frequency independent attenuation coefficient, α_0*) untuk struktur perkerasan berdasarkan spektrum kuasa auto dan fungsi koheren, serta penentuan nilai rasio pelemahan (*damping ratio*).

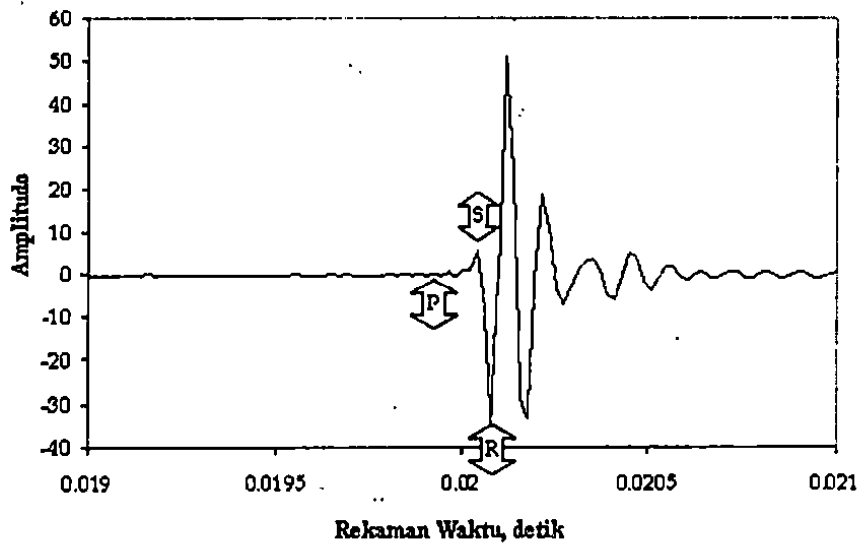
Walaupun respon frekuensi (*frequency response*) diperoleh dari nilai frekuensi pada amplitudo tertinggi spektrum kuasa auto yang diukur di lapisan aspal dan tanah dasar perkerasan jalan. Kedalaman lapisan profil boleh ditentukan dari panjang gelombang permukaan yang penetrasi kepada lapisan. Dari hasil profil model diketahui bahwa kedalaman lapisan aspal adalah 70 mm dari permukaan perkerasan jalan. Untuk ini data spektrum pada konfigurasi jarak di antara sensor 50 mm pada lapisan ATB dipertimbangkan untuk perhitungan koefisien pengurangan aspal.

Apabila gelombang mekanik dibangkitkan dari sesuatu sumber gelombang, sensor pertama

seterusnya proses yang sama dilakukan oleh sensor kedua. Gambar 5.102 menjelaskan sinyal berdomain waktu untuk kedua sensor dari salah satu contoh pengukuran pada jarak sensor 50 mm yang mengesan lapisan aspal perkerasan jalan.



(a) sensor pertama

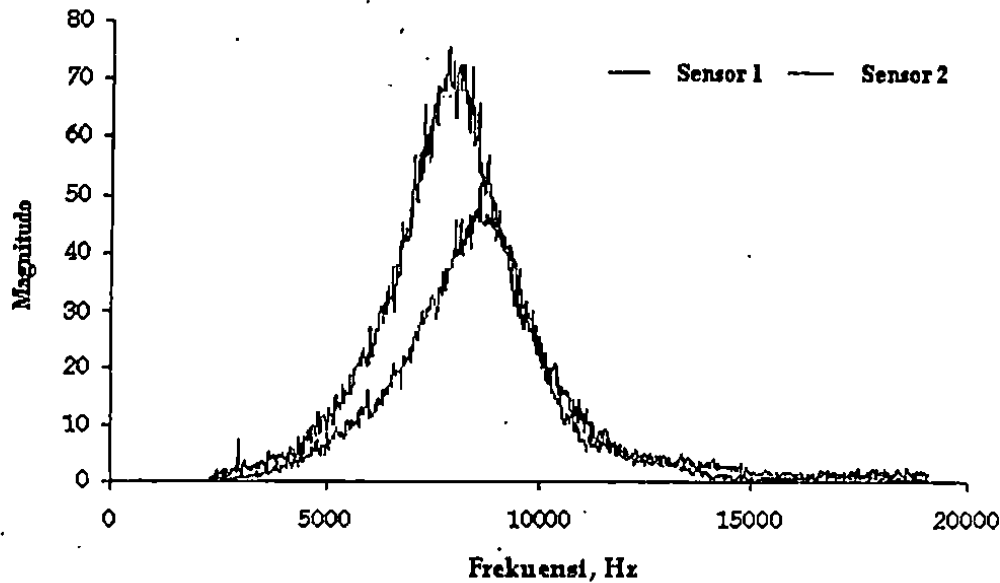


(b) sensor kedua

Gambar 5.102 Perakaman sinyal dalam domain waktu untuk sensor pertama dan kedua pada jarak sensor 50 mm

Dari kedua sensor, kelompok gelombang P dideteksi dahulu yang diikuti oleh gelombang S dan R. Meskipun gelombang R tiba paling lambat, namun dapat memberikan nilai amplitudo yang paling besar. Perakaman ini dapat juga lebih baik dipertimbangkan melalui spektrum auto dari

proses transformasi FFT bagi kedua sensor (Gambar 5.103). Pengurangan amplitudo gelombang R juga lebih jelas dilihat dalam spektrum auto dengan domain frekuensinya. Amplitudonya dapat berkurang setelah mencapai frekuensi puncaknya. Berasaskan selisih amplitudo di kedua sensor, nilai frekuensi yang dominan dan jarak sensor, koefisien pengurangan pada bahan aspal lapisan permukaan perkerasan jalan boleh ditentukan dengan mudah.



Gambar 5.103 Spektrum kuasa auto pada kedua sensor untuk jarak 50 mm

Wilayah rasio amplitudo sensor pertama berbanding amplitudo sensor kedua diperolehi dengan menyaring nilai koheren sinyal yang diterima oleh kedua sensor melalui spektrum koheren. Nilai amplitudo yang digunakan adalah julat frekuensi yang mana memiliki nilai magnitudo koheren di atas 0.98. Gambar 5.104 menjelaskan hasil penyaringan sinyal dengan nilai koheren di bawah 0.98. Julat frekuensi lebar jalur (bandwidth) untuk amplitudo isyarat yang baik ialah diantara 4800 hingga 11900 Hz dengan frekuensi puncak 9100 Hz. Pada kes jarak sensor ini tidak ditemui adanya dua puncak amplitudo. Oleh karena itu boleh dipastikan bahawa pengurangan sinyal yang diterima hanya terjadi pada lapisan permukaan aspal saja.

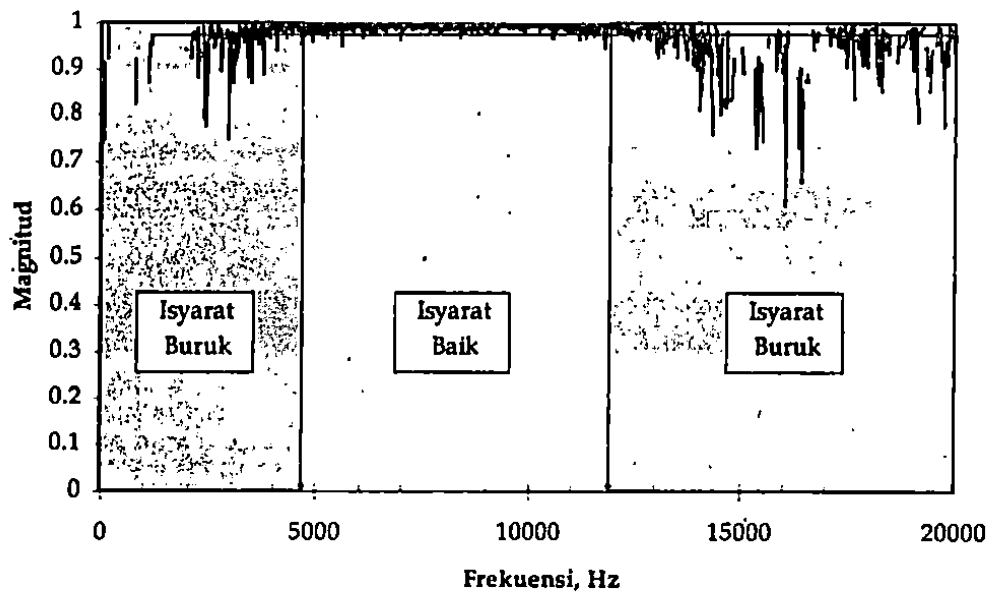
Jika kedudukan geometrik sensor pertama (r_1) = 0.05 m, sensor kedua (r_2) = 0.1 m, jarak diantara sensor ($r_2 - r_1$) = 0.05 m, rasio kedua jarak sensor (r_2/r_1) = 2, maka persamaan koefisien pengurangan (koefisien Damping) dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\frac{w_1}{w_2} = (2)^{0.5} \exp^{-\alpha(0.05)f} = 1.414 \exp - 0.05\alpha f \quad (5.1)$$

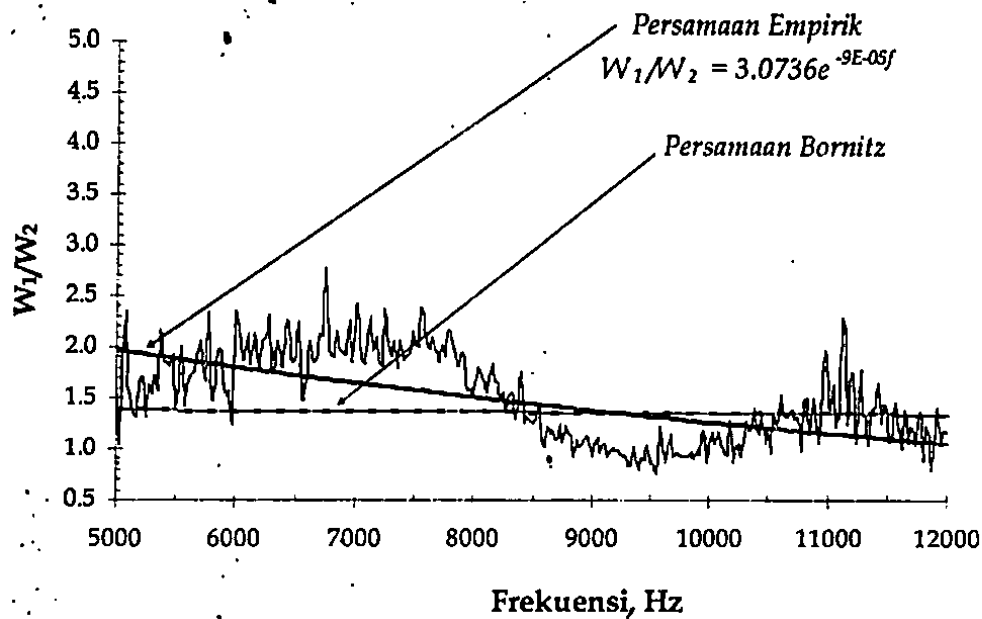
disini $n = 0.5$ adalah nilai koefisien pengurangan bagi pengurangan radiasi gelombang permukaan yang diberikan di atas permukaan media (Kim et al. 1998). Selanjutnya dari data spektrum auto pada Gambar 5.103, diperoleh persamaan empirik yang mengkaitkan rasio amplitudo dengan frekuensi sebagai (Gambar 5.105):

$$\frac{w_1}{w_2} = 3.0736 e^{-9E-05 f} \quad (5.2)$$

Seterusnya kedua kurva teori dan empirik dipadankan bagi mendapatkan kurva perpadanan terbaik (best fit curve). Lengkung padanan terbaik diperolehi pada julat frekuensi dominan 4800 hingga 11900 Hz yang mana akhirnya nilai koefisien pengurangan yang tak bersandar frekuensi yang diterbitkan adalah $\alpha_0 = 0.776 \times 10^{-3} \text{ s/m}$.



Gambar 5.104 Spektrum fungsi keheran untuk jarak sensor 50 mm

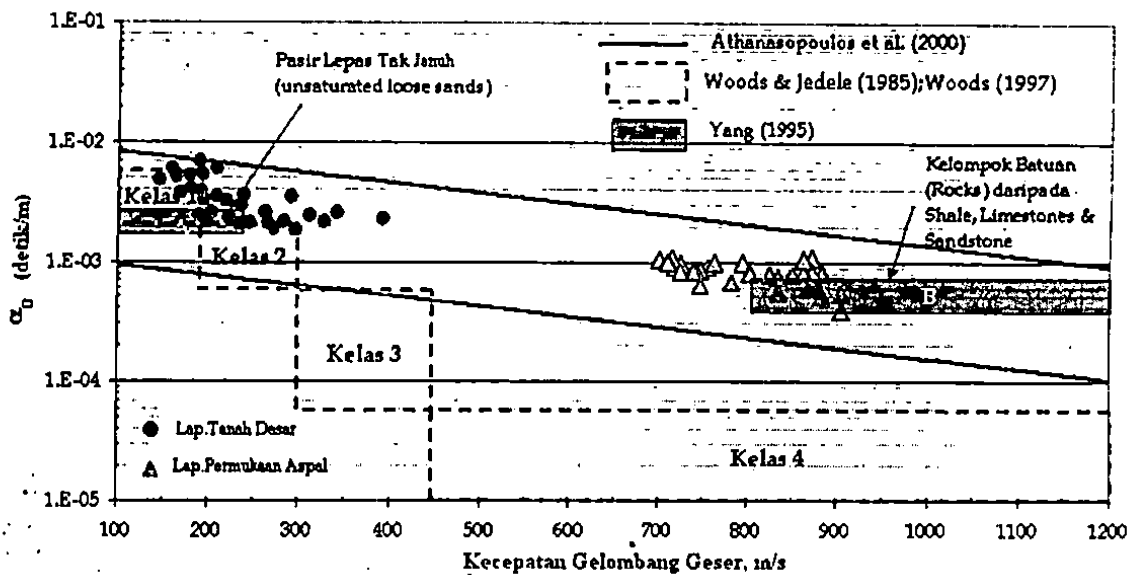


Gambar 5.105. Rasio amplitudo di kedua sensor terhadap frekuensi pada pengukuran jarak sensor 50 mm

Keseluruhan pengukuran koefisien pengurangan pada lapisan aspal dan tanah dasar perkerasan jalan ditunjukkan dalam Gambar 5.106. α_0 lapisan aspal diperoleh dalam wilayah $(0.384 - 1.096) \times 10^{-3}$ s/m dengan nilai rerata 0.807×10^{-3} s/m untuk kecepatan gelombang geser dari 700.634 hingga 903.61 m/s. Untuk α_0 lapisan tanah dasar diperoleh dalam $1.82 - 6.761 \times 10^{-3}$ s/m dengan nilai rerata 3.3361×10^{-3} s/m untuk kecepatan gelombang 145.94 hingga 392.70 m/s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa α_0 pada struktur perkerasan jalan akan meningkat dengan kedalaman (dari lapisan permukaan) dan berkurang dengan nilai kekakuan bahan.

Dari Gambar 5.106 dijelaskan bahawa α_0 lapisan aspal dari kajian ini adalah hampir sama dengan kelompok batuan dari kajian Yang (1995) yaitu pada $0.385 - 0.775 \times 10^{-2}$ s/m, sedangkan perbandingan dengan kelompok batuan kelas IV ($\alpha_0 < 0.6 \times 10^{-4}$ s/m) dari Woods & Jendele (1985) dan Woods (1997) menunjukkan α_0 yang berbeda. Perbedaan ini karena lapisan aspal memiliki kekakuan yang lebih rendah dari kelompok batuan (seperti yang dikaji oleh Woods & Jendele 1985; Woods 1997) yang mana ikatan diantara partikelnya adalah lebih kuat dan mempunyai rasio pori yang sangat kecil. Pengaruh lain yang mungkin adalah pengaruh sifat viskositas aspal akibat perubahan suhu. Pada kajian ini, pengukuran ke atas lapisan aspal dilakukan pada peringkat suhu tertinggi harian yang mana sifat kekakuan

lapisan ini berada pada peringkat yang paling rendah. Hal ini mengakibatkan gelombang R yang merambat memberikan respon frekuensi yang lebih rendah.



Gambar 5.106 Nilai koefisien pengurangan terhadap nilai kecepatan gelombang geser

Julat koefisien pengurangan lapisan tanah dasar dari kajian ini diperoleh bersesuaian dengan kelas I ($2 - 6 \times 10^{-3}$ s/m) dan sebagiannya hampir sama dengan kelas II ($0.6 - 2 \times 10^{-3}$ s/m) dari Woods & Jedgele (1985) pada kecepatan gelombang geser kelas I (< 192.062 m/s dengan NSPT < 5) dan kelas II ($192.062 - 285.237$ m/s dengan NSPT $5 - 15$) dari Woods (1997). Kelas I dan II dijelaskan sebagai kumpulan tanah lunak (soft soil) dan tanah keras (competent soil). Manakala perbandingan koefisien pengurangan tanah dasar Yang (1995) menunjukkan bahwa nilai koefisien pengurangan hasil kajian ini berada pada peringkat yang lebih tinggi. Ini karena Yang (1995) menjalankan kajian pada bahan yang berbeda yaitu tanah lempung lembut (soft clay) dan tanah pasir lepas yang tak jenuh (unsaturated loose sand) dalam 1.8 hingga 2.05×10^{-2} s/m, sedangkan dalam kajian ini merupakan tanah berpasir.

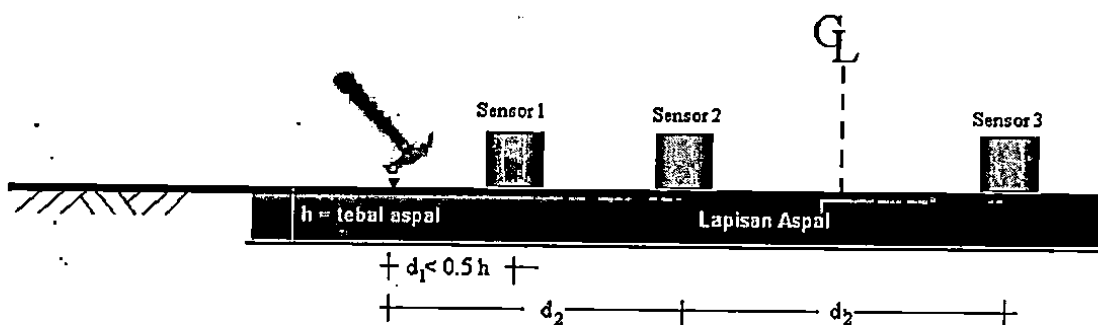
Hasil koefisien pengurangan tak bersandar frekuensi lapisan aspal dan tanah dasar dari kajian ini menunjukkan julat koefisien yang berada dalam batas atas dan bawah persamaan empirik kecepatan gelombang geser dan koefisien pengurangan dari Athanasopoulos et al. (2000). Selanjutnya profil rasio pelemahan dapat diperoleh dengan mudah dari nilai koefisien

I. Sistem Eksperimen Terpadu

Suatu sistem eksperimental terpadu telah diusulkan dalam penelitian ini. Tiga sensor digunakan untuk mendapatkan data perambatan gelombang. Sensor pertama difungsikan sebagai analisis impact-echo yang melibatkan perhitungan kecepatan gelombang P untuk mendapatkan nilai ketebalan lapisan permukaan secara cepat dan sebagai masukan bagi proses inversi khususnya untuk keakuratan penilaian ketebalan lapisan permukaan perkerasan. Sensor kedua dan ketiga digunakan untuk mendapatkan kecepatan gelombang P dan S yang mewakili nilai kekakuan bahan lapisan permukaan.

Berikut ini adalah prosedur pengujian yang diusulkan untuk sistem eksperimental terpadu, yaitu:

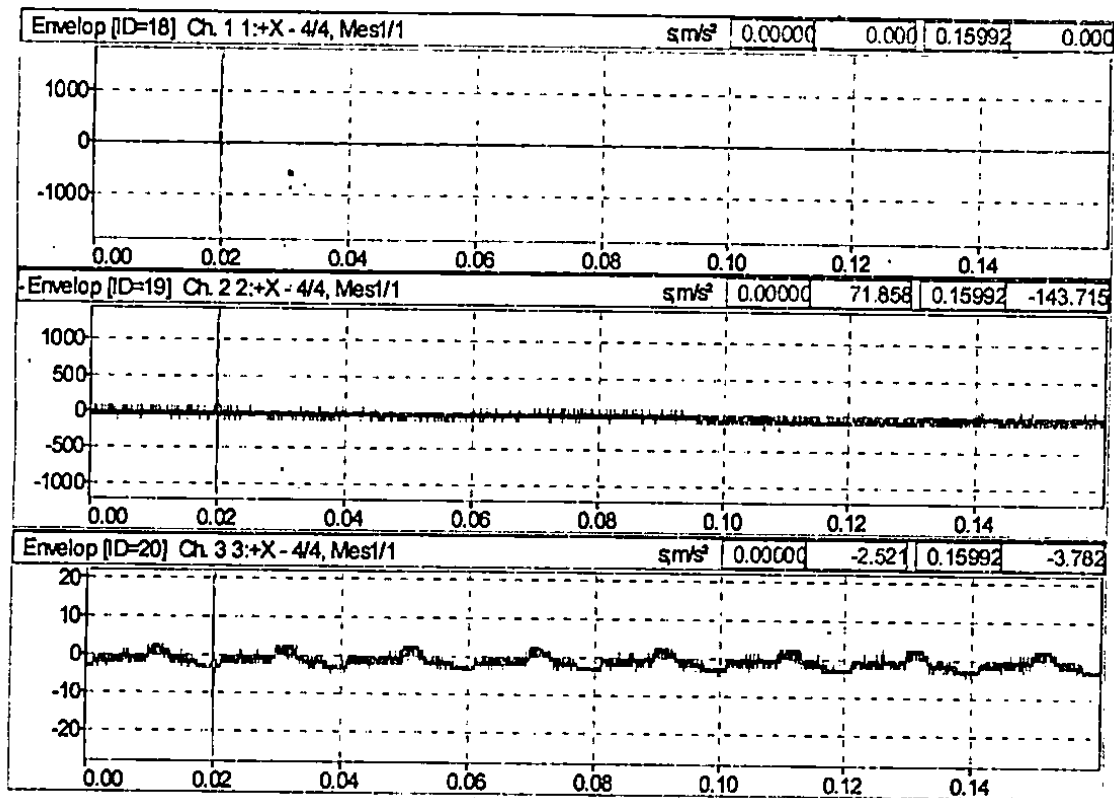
1. Garis tengah imajiner dalam susunan sensor diukur dan ditentukan. Seterusnya dua sensor dengan spesifikasi yang sama, diletakkan dalam satu garis lurus di atas permukaan lapisan yang telah diukur mengikut konfigurasi titik tengah sensor (Gambar 5.107). Sensor ketiga diletakkan dekat dengan sumber gelombang yang jaraknya adalah kurang dari setengah tebal perkerasan ukur prediksi. Ketiga 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. Penganalisis spektrum selanjutnya diatur untuk menunjukkan operasi spektrum tenaga, fungsi transfer atau spektrum tenaga silang dan fungsi koheren.



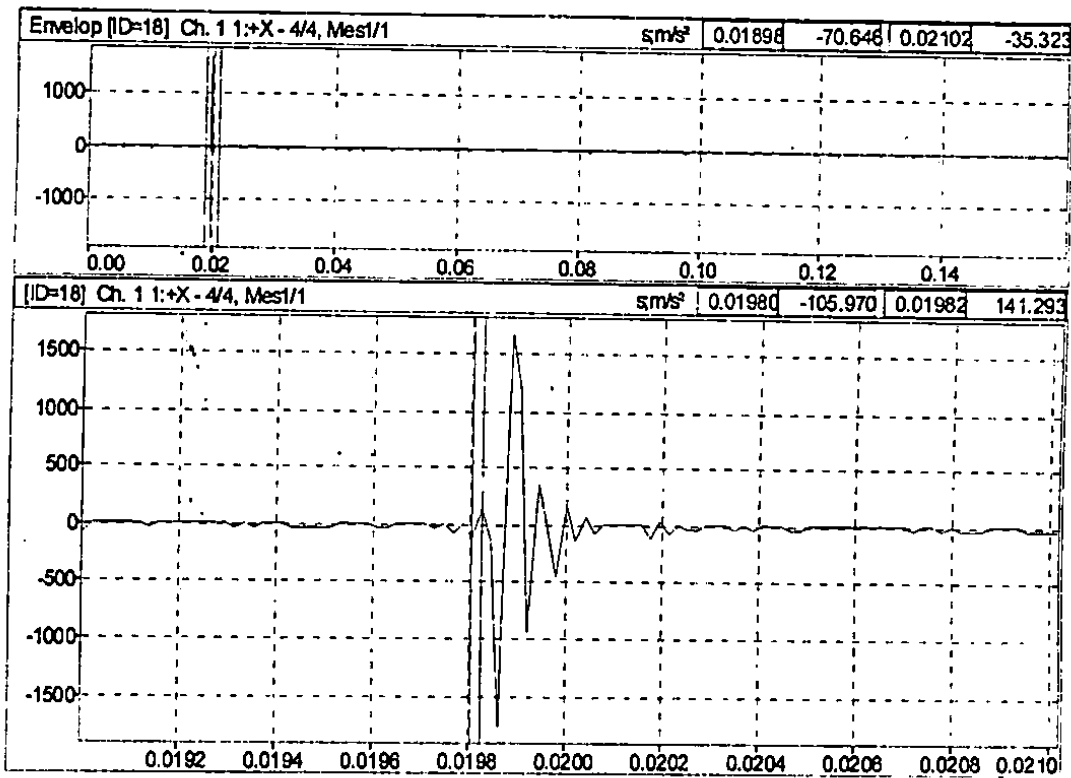
Gambar 5.107. Konfigurasi sensor untuk sistem eksperimental terpadu.

2. Gelombang seismik dihasilkan dari sumber gelombang yang dijatuhkan atau dipukul dengan energi terbatas ke atas permukaan jalan guna menyalurkan energi seismik tersebut menuju ke ketiga sensor. Penghasilan dan perekaman gelombang dilakukan secara berulang kali untuk memperoleh sinyal rata-rata dalam domain frekuensi.
3. Spektrum selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan tebal perkerasan untuk proses inverse dari Persamaan 4.32.

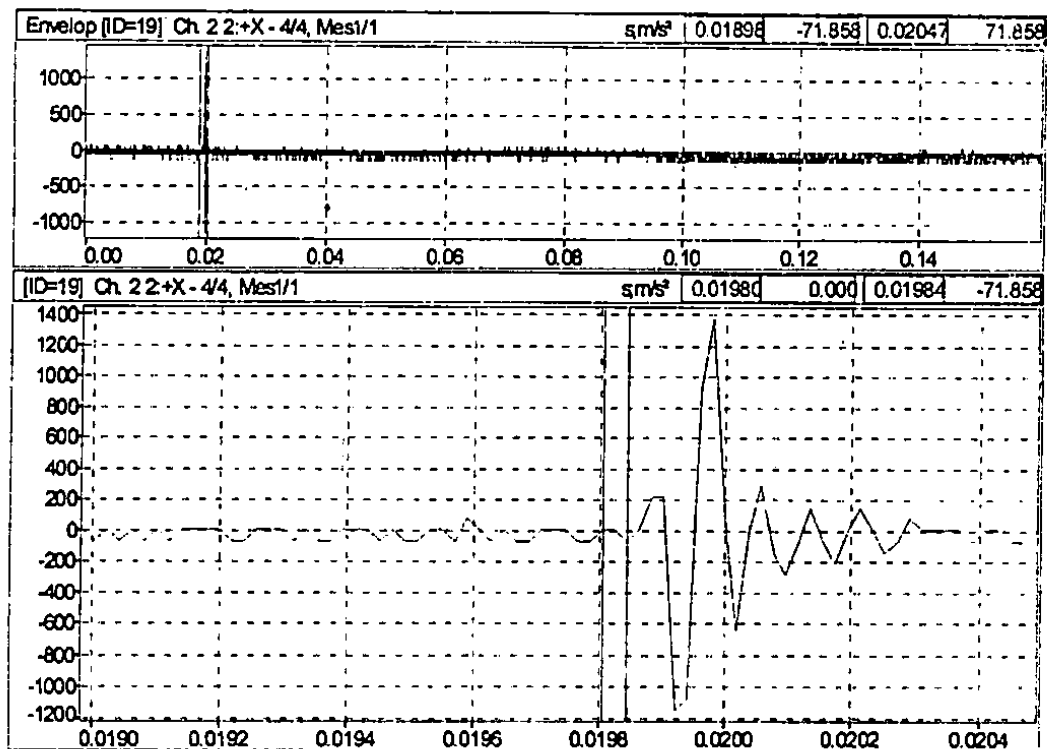
Hasil perekaman data seismik dari sensor pertama hingga ketiga dalam sistem terpadu SASW diberikan dalam Gambar 5.108. Gambar 5.109 dan Gambar 5.110 menunjukkan tampilan detil dari rekaman data sensor pertama dan kedua. Dari data sensor ini dapat diperoleh nilai waktu ketibaan gelombang P.



Gambar 5.108 Tampilan detail dari rekaman data sensor pertama dan kedua.



Gambar 5.109 Rekaman data gelombang sensor pertama

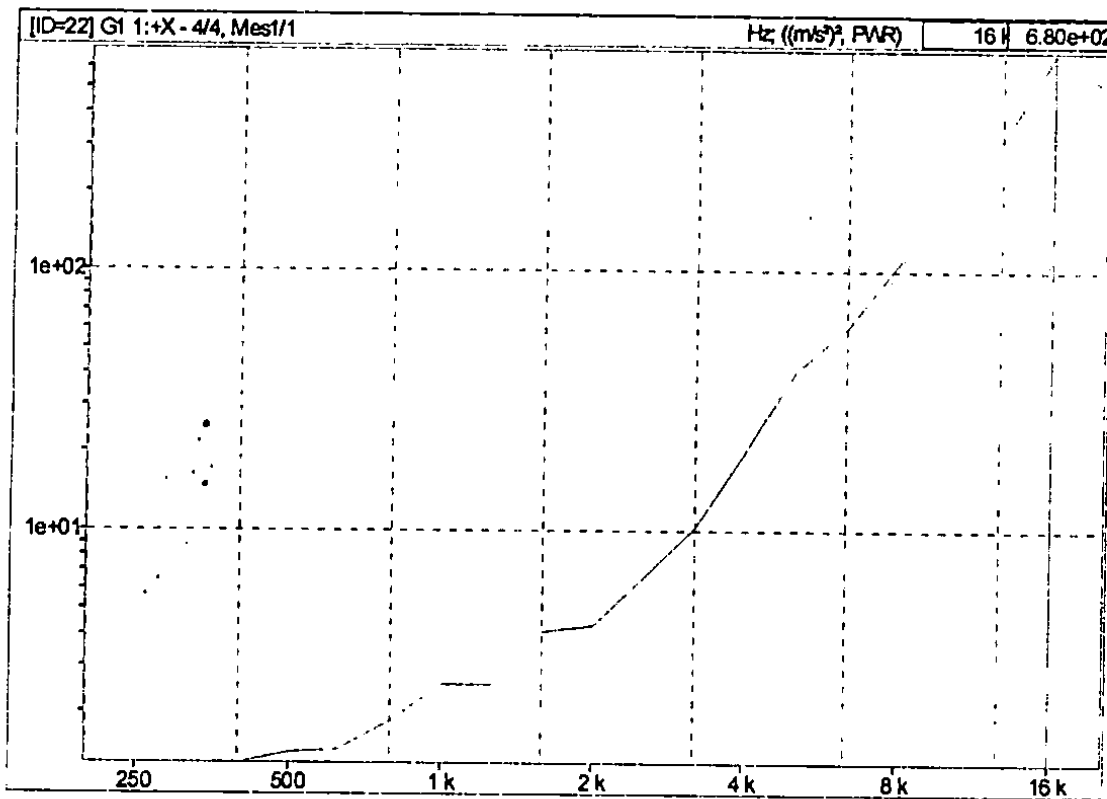


Gambar 5.110 Rekaman data gelombang sensor kedua

Dari Persamaan 4.32, data waktu kedatangan gelombang P pada sensor pertama dan kedua perlu dianalisis terlebih dahulu. Tabel 5.21 menunjukkan data perambatan gelombang yang diperoleh dari Gambar 5.109 dan Gambar 5.110. Gambar 5.111 menunjukkan respon spektrum auto dari sinyal yang direkam dalam Gambar 5.109. Puncak frekuensi (f_T) diperoleh sebesar 16 kHz.

Tabel 5.21 Perhitungan kecepatan gelombang P

Parameter Ukur	Pengukuran dan Perhitungan
T_2 dari Gambar 5.110	0.01984 detik
T_1 dari Gambar 5.109	0.01982 detik
delta T	2E-05 detik
Jarak antar sensor	0.05 m
C_p (kecepatan gelombang P)	1500 m/s
C_s (kecepatan gelombang S)	890 m/s



Gambar 5.111 Rekaman data gelombang sensor kedua

Dari Persamaan 4.32, tebal perkerasan jalan terhitung diperoleh sebesar 0.0468 m. Perbedaan dari model perkerasan jalan sebesar 6,4 %. Analisis ini cukup baik dengan deviasi 10 % dan bisa dijadikan acuan untuk analisis lain.

pengukuran SASW. Dengan demikian, dapat diperoleh hasil yang lebih akurat terhadap hasil pengukuran SASW. Dari sensor kedua dan ketiga sendiri dapat diperoleh secara cepat nilai kecepatan fase. Sistem eksperimen terpadu yang diusulkan ini perlu dilakukan kalibrasi ukur dengan banyak pengukuran eksperimen sehingga bisa diperoleh sistem yang lebih baik.