

TEKNOLOGI SASW

UNTUK EVALUASI
PERKERASAN JALAN

Permasalahan yang dihadapi dalam manajemen perkerasan jalan di Indonesia adalah menentukan teknik penilaian jalan yang dapat memonitor depresiasi kekuatan jalan secara cepat dan tepat. Selain itu, minimnya dana pemeliharaan jalan dan luasnya jaringan jalan yang ada menyebabkan banyak infrastruktur jalan yang terlambat untuk diidentifikasi dini untuk mencegah kerusakan yang meluas. Teknologi evaluasi jalan yang inovatif, cepat dalam operasional, memiliki hasil akhir yang akurat dan sekaligus ekonomis menjadi salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan manajemen perkerasan jalan tersebut. Buku ini mengulas teknologi Spectral Analysis of Surface Waves (SASW) sebagai teknologi evaluasi dan penilaian struktural perkerasan jalan jalan yang bersifat tidak merusak (non-destructive testing, NDT) dan akurat. Teknik SASW dikembangkan berdasarkan analisis perambatan gelombang seismik permukaan Rayleigh pada media elastis yang dihasilkan dari sumber mekanik buatan. Teknik ini dapat digunakan untuk mendeteksi nilai modulus elastisitas, setiap bahan lapisan perkerasan dengan baik. Profil tomografi 2-D tomografi modulus elastisitas juga dapat dihasilkan dari teknik ini untuk memudahkan insinyur dan praktisi dalam melakukan pengawasan anomali pada lapisan dan mengukur kinerja perkerasan jalan dengan tepat. Teknik SASW memiliki korelasi yang baik dengan pengujian NDT jalan lainnya seperti falling weight deflectometer (FWD).

TEKNOLOGI SASW UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

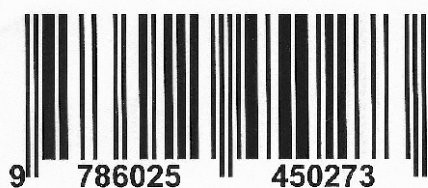


TEKNOLOGI SASW

UNTUK EVALUASI
PERKERASAN JALAN

Sri Atmaja P. Rosyidi
Mohd. Raihan Taha
Nur Izzi Md. Yusoff

ISBN 978-602-5450-27-3



LEMBAGA PENELITIAN, PUBLIKASI,
DAN PENGABDIAN MASYARAKAT (LP3M)
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA
Gedung D2, Kampus Terpadu UMY
Ringroad Tamantirto, Kasihan, Bantul,
Yogyakarta, Indonesia 55183
Tel. +62 274.387656 ext. 166
Fax. +62 274.387646
www.umy.ac.id

TEKNOLOGI SASW UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

*Sri Atmaja P. Rosyidi
Mohd. Raihan Taha
Nur Izzati Md. Yusoff*

TEKNOLOGI SASW

UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

Sri Atmaja P. Rosyidi
Mohd. Raihan Taha
Nur Izzi Md. Yusoff

Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (LP3M UMY)
2017

TEKNOLOGI SASW UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

Penulis : Sri Atmaja P. Rosyidi, Ph.D.
Desain : Djoko Supriyanto

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-undang
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau
Seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan I, Desember 2017

Penerbit Lembaga Penelitian, Publikasi & Pengabdian Masyarakat
(LP3M) dan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan Bantul Yogyakarta.
Telp : 0274-387656 pesawat 159

Perpustakaan Nasional RI: Katalog Dalam Terbitan (KDT)
TEKNOLOGI SASW UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

Sri Atmaja P. Rosyidi, Ph.D.
Yogyakarta, LP3M-UMY 2017



Karya ini penulis persembahkan kepada:

Allah SWT, sebagai wujud pengabdian dan ibadah, serta bentuk kesyukuran penulis. Semoga Allah mengkaruniakan rahmat dan keberkahanNya menjadikan karya ini sebagai ilmu yang bermanfaat dan amal jariyah. *Amin*

Orang tua kami tercinta, keluarga kami, *isteri dan anak-anak* tersayang yang senantiasa memberikan doa dan dukungan kepada penulis,

Para *ilmuan, praktisi* dan *insinyur* bidang perkerasan jalan. Semoga tulisan sederhana ini bisa memberikan manfaat bagi pengembangan bidang perkerasan jalan.

Daftar Isi

Daftar Isi – VI
Kata Pengantar – IX

1 PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SEISMIK UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN – 1	
1.1 Infrastruktur Jalan dan Pembangunan Ekonomi – 1	
1.2 Teknologi Evaluasi Perkerasan Jalan – 8	
1.3 Perkembangan Teknologi NDT Berbasis Seismik – 11	
1.4 Teknik Seismik untuk Perkerasan Jalan – 14	
2 KONSEP GELOMBANG PERMUKAAN: DASAR TEORI DAN PENDEKATAN MATEMATIK – 18	
2.1 Pengantar – 18	
2.2 Sifat Mekanik Gelombang Seismik Permukaan – 19	
1. Bentuk dan Arah Perambatan Gelombang – 19	
2. Sifat Peredaman Gelombang Permukaan – 24	
3. Sifat Dispersif Gelombang Permukaan – 25	
2.3 Pendekatan Matematika dalam Gelombang Seismik – 29	
1. Persamaan Umum Perambatan Gelombang Seismik – 29	
2. Matrik Perpindahan untuk Perambatan Gelombang 2 Dimensi – 33	
3. Matrik Kekakuan untuk Perambatan Gelombang 2 Dimensi – 38	
4. Matrik Kekakuan 3 D untuk Simpangan Gelombang R – 43	
3 TRANSFORMASI FOURIER DAN ANALISIS SPEKTRUM – 48	
3.1 PENGANTAR – 48	
3.2 Transformasi Fourier – 49	
1. Dasar Analisis Fourier – 49	
2. Transformasi Fourier – 51	
3. Transformasi Fourier Diskrit (DFT) – 52	
4. Transformasi Fourier Cepat (FFT) – 53	
3.3 ANALISIS SPEKTRUM – 55	
1. Konsep Spektrum Linier – 55	
2. Persamaan Dasar Analisis Spektrum dalam Teknik SASW – 57	
3. Studi Kasus: Aplikasi Analisis Spektrum dalam Teknik SASW untuk Pengukuran Perkerasan Jalan – 59	
4 PRINSIP TEKNIK SASW DAN PERALATAN PENGUKURAN – 68	
4.1 Pengantar – 68	
4.2 Prinsip Kerja dalam Teknik SASW – 68	

1	Pengaruh Frekuensi dan Panjang Gelombang terhadap Kecepatan Fase Gelombang Permukaan –	68
2	Pengaruh Mode Lebih Tinggi pada Profil Irregular –	70
4.3	Peralatan untuk Pengujian Lapangan –	71
1	Sumber Gelombang –	72
2	Sensor Gelombang –	76
3	Penganalisis Spektrum –	80
5	KONFIGURASI LAPANGAN UNTUK PENGUKURAN PROFIL JALAN –	82
5.1	Tahapan Analisis dalam Teknik SASW –	82
5.2	Pengaturan Sumber Gelombang dan Sensor –	83
5.3	Konfigurasi Geometrik –	86
5.4	Prosedur Pengujian Lapangan –	87
5.5	Perencanaan Jarak Antar Sensor –	91
6	PEMBANGUNAN KURVA DISPERSI KECEPATAN FASE –	94
6.1	Pengantar –	94
6.2	Analisis Penyaringan Sinyal (Masking) –	96
6.3	Analisis Penyaringan Respon Impuls (Impulse Response <i>Filtering</i> , IRF) –	98
1.	Prosedur IRF –	98
2.	Contoh Aplikasi –	100
6.4	Metode Beda Fase (Phase Different Method) –	102
6.5	Model Penyederhanaan Kurva Dispersi –	103
6.6	Contoh Kasus Pembangunan Kurva Dispersi untuk Profil Perkerasan Jalan –	106
7	ANALISIS INVERSI DAN PROFIL KEKAKUAN BAHAN –	110
7.1	Pengantar –	110
1	Prosedur Umum Analisis Inversi SASW –	110
2	Kurva Dispersi Teori 2 D dan 3 D Matriks Kekakuan Dinamik –	111
7.2	Prosedur Analisis Inversi –	112
1	Parameter Model Permulaan (Starting Model Parameter, SMP) –	113
2	Perhitungan Matrik Sensitifitas (G) dan Analisis Matrik Kovarian (C) –	116
3	Pembangunan Analisis Resolusi (Resolution Analysis) –	119
7.3	Modulus Elastisitas Bahan –	119
7.4	Studi Kasus: Inversi dengan Model 2 D dan 3 D untuk Profil Perkerasan Jalan –	120
8	SIMULASI PERAMBATAN GELOMBANG 2 D DAN 3 D DALAM ANALISIS INVERSI –	125
13.1	Pengantar –	125
13.2	Simulasi Model 2 D dan 3 D pada Struktur Perkerasan Jalan –	125
1	Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Heterogen –	125
2	Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen dengan Kecepatan Gelombang Geser yang Rendah –	144
3	Model Artifisial Tidak Reguler (Irregular) dan Heterogen –	145
13.3	Diskusi Hasil Simulasi 2 D dan 3 D –	150
9	APLIKASI TEKNOLOGI SASW PADA PERKERASAN JALAN –	152
9.1	Pengantar –	152

- 9.2 Aplikasi pada Model Perkerasan Jalan – 152
- 9.3 Aplikasi pada Perkerasan Jalan Terpasang – 162
- 9.4 Sistem Tomografi untuk Profil 2-D Modulus Elastisitas – 169

Referensi – 176

Indeks – 183

Tentang Penulis – 185

Kata Pengantar

Alhamdulillah, puji syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan karunia dan hidayahNya, sehingga penulis telah diberikan anugerah yang tak terkira untuk bisa menyelesaikan buku teks yang berjudul: **“Teknologi SASW untuk Evaluasi Perkerasan Jalan”**.

Disadari bahwa, upaya untuk mengelola infrastruktur jalan tidak mudah. Disamping, penambahan kilometer jalan yang semakin panjang, tuntutan untuk menjaga kualitas jalan menjadi semakin penting guna memperoleh kemanfaatan infrastruktur jalan yang semakin meluas baik dari sisi ekonomi maupun sosial bagi masyarakat. Untuk menjawab tantangan tersebut, perlu dikembangkan teknik evaluasi jalan yang tidak merusak, ekonomis dan efisien, serta memiliki keakuratan tinggi dalam mengenali kinerja perkerasan jalan. Buku ini merupakan bagian dari usaha yang dilakukan oleh penulis untuk memperkenalkan lebih luas mengenai metode analisis spektrum gelombang permukaan (SASW) sebagai inovasi teknologi pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing*, NDT) dalam bidang perkerasan jalan. Teknologi NDT berbasis gelombang seismik permukaan telah mulai dikembangkan sebagai salah satu teknik penilaian tanah dan perkerasan jalan di tahun 1980an, namun teknologi ini belum meluas dikenal dan diimplementasikan di Indonesia. Buku ini dihasilkan dari penelusuran dan pengalaman yang dilakukan oleh penulis dari berbagai penelitian yang dilakukan sejak tahun 2001 dalam bidang seismik SASW dan aplikasinya untuk perkerasan jalan dan investigasi sub-permukaan. Buku ini selanjutnya diharapkan bisa digunakan sebagai referensi bagi penelitian dan pengembangan teknologi evaluasi perkerasan jalan khususnya untuk pengujian non-destructive testing (NDT). Selain itu, buku ini juga dapat menjadi buku acuan dasar bagi para peneliti dan insinyur (praktisi) yang ingin mengembangkan metode monitoring infrastruktur perkerasan jalan berbasis gelombang seismik dan ultrasonik-mekanik. Karena pendapat penulis, sudah saatnya manajemen perkerasan jalan perlu menerapkan pengujian-pengujian jalan NDT untuk mengurangi biaya dalam pemeliharaan dan mendapatkan kinerja perkerasan jalan secara cepat dan tepat. Dengan demikian, langkah-langkah pemeliharaan dan rehabilitasi dapat dilakukan dengan cepat untuk mencegah kerusakan jalan yang semakin meluas dan memprediksi depresiasi kekuatan jalan.

Motivasi: Al Qur'an dan Sains dalam Manajemen Jalan

مُصْلِحُونَ نَحْنُ إِنَّمَا قَالُوا الْأَرْضُ فِي نَفْسِدُوا لَا لَهُمْ قِيلَ وَإِذَا

يَشْعُرُونَ لَا وَلَكِنَّ الْمُفْسِدُونَ هُمْ إِنَّهُمْ إِلَّا

" Dan bila dikatakan kepada mereka: "Janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi". Mereka menjawab: " Sesungguhnya kami orang-orang yang mengadakan perbaikan"

"Ingatlah, sesungguhnya mereka itulah orang-orang yang membuat kerusakan, tetapi mereka tidak sadar"

(Al Baqaroh: 11-12)

فِيهَا سِدْفٌ مِّنْ فِيهَا أَنْجَعُ قَالُوا ۖ خَلِيفَةً الْأَرْضِ فِي جَاعِلٌ إِيَّيَ لِلْمَلَائِكَةِ رَبُّكَ قَالَ وَإِذْ تَعْلَمُونَ لَا مَا أَعْلَمُ إِيَّيَ قَالَ ۖ لَكَ وَتُقَدِّسُ بِحَمْدِكَ نُسَبِّحُ وَنَحْنُ الدِّمَاءُ وَيَسْفِكُ

"Ingatlah ketika Tuhanmu berfirman kepada para Malaikat: "Sesungguhnya Aku hendak menjadikan seorang khalifah di muka bumi". Mereka berkata: "Mengapa Engkau hendak menjadikan (khalifah) di bumi itu orang yang akan membuat kerusakan padanya dan menumpahkan darah, padahal kami senantiasa bertasbih dengan memuji Engkau dan mensucikan Engkau?" Tuhan berfirman: "Sesungguhnya Aku mengetahui apa yang tidak kamu ketahui"."

(Al Baqaroh: 30)

Dalam Al Qur'an, telah diingatkan oleh Allah bahwa manusia memiliki potensi untuk melakukan eksplorasi dan eksploitasi di bumi ini sebagai fungsi sebagai khalifah. Namun Allah melarang manusia untuk berbuat kerusakan, baik di darat, di laut, di udara bahkan dimana saja. Karena kerusakan yang disebabkan ulah manusia itu akan membahayakan pada sistem dan tatanan kehidupan manusia sendiri, seperti kerusakan tata lingkungan alam, dan kerusakan akibat tidak dikelolanya hasil-hasil eksploitasi manusia terhadap sumber alam dan infrastruktur yang dibangunnya.

Manusia sebagai khalifah harus memiliki kemauan dan upaya untuk memakmurkan bumi. Yang dimaksud memakmurkan bumi adalah menjadikan sistem yang berkembang di bumi, baik upaya eksplorasi dan eksploitasi manusia, menjadikan bertambahnya keberkahan dan kemanfaatan bagi manusia maupun sistem bumi itu sendiri. Guna menyokong sistem kehidupan manusia yang dikembangkan bagi tercapainya kemakmuran, tentunya memerlukan alat (sarana) dan media (prasarana/infrastruktur). Keterkaitan kemakmuran dengan sarana dan infrastruktur disini adalah upaya menjaga sistem kehidupan manusia melalui sarana dan infrastruktur yang berdayaguna, berkembang dan berkelanjutan.

Bercermin dari motivasi di atas, bahwa manusia memerlukan infrastruktur untuk menjaga sistem kehidupan manusia menjadi lebih baik dan berkembang. Tentu, perlu upaya yang tersistematis untuk menjaga supaya sistem tersebut tetap berdaya guna dan berkelanjutan, diperlukan usaha pengelolaan atau manajemen. Salah satu kegiatan yang penting dalam manajemen infrastruktur adalah bagaimana kita bisa melakukan evaluasi dan penilaian kepada infrastruktur itu sendiri, sehingga memahami kinerja infrastruktur untuk dapat

dimanfaatkan secara efisien dan berkelanjutan. Hal inilah yang menjadi motivasi spiritual penulis untuk mengembangkan teknologi inovasi SASW di bidang infrastruktur jalan.

Organisasi Buku

Buku ini dibagi dalam sembilan bagian yang masing-masing memberikan penjelasan secara umum dan khusus mengenai metode SASW. Bagian pertama, menjelaskan keterkaitan problematik infrastruktur jalan di Indonesia dan kepentingan bagi pembangunan bangsa. Beberapa keunggulan teknologi evaluasi jalan juag diperkenalkan dan dibandingkan dalam bab ini. Selanjutnya, pengetahuan mengenai dasar-dasar teori dan pemahaman mengenai gelombang permukaan yang menjadi konsep dalam teknik SASW dijelaskan dalam bab kedua.

Bagian ketiga buku ini (Bab III) mempresentasikan teori transformasi frekuensi menggunakan fourier dan analisis spektrum yang dipergunakan dalam teknik SASW. Bagian ini penting sebagai pengantar untuk memahami pemrosesan data yang digunakan untuk mengubah domain waktu ke domain frekuensi dari catatan gelombang seismik permukaan yang direkam. Melalui analisis spektrum , selanjutnya data-data perambatan gelombang seismik akan diinterpretasikan lebih lanjut dalam analisis kurva dispersi. Sifat dispersi gelombang permukaan merupakan kunci utama dari metode SASW. Untuk itu, penjelasan mengenai tahapan-tahapan praktis dalam teknologi SASW mulai dari pengambilan data hingga proses analisis secara berkelanjutan dijelaskan dari Bab IV hingga Bab VII. Dalam Bab VIII diberikan contoh-contoh simulasi perambatan gelombang yang diperlukan untuk memahami sifat mode dasar dan mode tinggi dalam gelombang permukaan. Akhirnya, dalam Bab IX ditunjukkan contoh aplikasi teknologi SASW untuk evaluasi perkerasan jalan. Beberapa studi kasus mengenai kehandalan metode SASW untuk evaluasi perkerasan jalan juga dipresentasikan.

Penghargaan

Penulis menyampaikan penghargaan setinggi-tinggi kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan buku ini secara khususnya, dan kepada berbagai pihak yang telah banyak memberikan ilmu dan pengajaran kepada penulis dalam bidang metode SASW, dinamika tanah, analisis sinyal digital dan NDT untuk perkerasan jalan, yaitu kepada yang kami hormati: kolega dan sahabat kami Prof. Dr. Zamri Chik, Prof. Dr. Amiruddin Ismail, Khairul Anuar Mohd. Nayan (Universiti Kebangsaan Malaysia), Prof. Dr. Sung Ho Joh (Chung Ang University, Korea), Prof. Dr. Nenad Gucunski (Rutgers University, USA), Dr. Collin P. Abbiss (UK), Dr. Siegfried (Puslitbang Jalan dan Jembatan, Indonesia), Alm. Dr. Sentot Hardwiyono (UMY), Alm. Ir. Gendut Hantoro, MT (UMY). Penulis juga merekamkan penghargaan dan terima kasih kepada para asisten penulis yang telah membantu penulis dalam berbagai penelitian mengenai metode SASW.

Ucapan terima kasih, penulis sampaikan kepada Joko Supriyanto, S. Sn yang telah membantu menyempurnakan layout dan editing buku ini dan kepada LP3M UMY yang telah memberikan dukungan terhadap penerbitan buku ini. Terakhir, penulis menyampaikan terima kasih kepada keluarga tercinta, yang telah memberikan dukungan selama penulis menyelesaikan buku ini.

Mengambil pepatah “Tiada Gading yang Tak Retak”, penulis menyadari buku ini masih banyak kekurangan dan ketidaksempurnaan. Untuk itu, berbagai saran dan masukan akan sangat diharapkan oleh penulis guna memperbaiki dan menyempurnakan buku ini.

Yogyakarta, 15 November 2017

Sri Atmaja P. Rosyidi

Mohd. Raihan Taha

Nur Izzi Md. Yusoff

1

PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SEISMIC UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN

1.1 INFRASTRUKTUR JALAN DAN PEMBANGUNAN EKONOMI

Infrastruktur jalan merupakan salah satu fokus dalam sektor pembangunan yang menjadi perhatian penting pemerintah dalam program pembangunan di Indonesia. Ketersediaan infrastruktur jalan dalam segi kuantitas maupun kualitas mempunyai dampak langsung terhadap pembangunan ekonomi. Di tengah perkembangan positif perekonomian di Indonesia, saat ini, Indonesia dihadapkan pada tantangan pokok yakni masih terkendalanya pembangunan faktor produksi komplementer yang menghambat pencapaian pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi dan berkualitas (Maryaningsih, dkk., 2014). Dalam laporan terbarunya, World Economic Forum (WEF) mengungkapkan bahwa tingkat daya saing Indonesia masih tertinggal dibandingkan negara-negara lain (Tabel 1.1).

Tahun 2015, Indonesia dalam peringkat daya saing (GCI) berada pada rangking 37 dari 140 negara dengan indeks 4,5 dengan skala 1 hingga 7 (WEF). Faktor-faktor atau pilar yang diketahui masih rendah terutama pada pilar infrastruktur, pilar kesiapan teknologi, dan pilar inovasi. Penilaian WEF ini menunjukkan bahwa kendala struktural yang dihadapi Indonesia masih di seputar ketiga pilar tersebut dalam sepuluh tahun terakhir. Secara lebih spesifik, kendala pilar infrastruktur antara lain bersumber dari masih rendahnya kualitas jalan, pelabuhan, bandara hingga kereta api (Tabel 1.2). Nilai indeks yang ditunjukkan untuk kualitas infrastruktur jalan sebesar 3,7 (skala 1 hingga 7) dengan peringkat negara, Indonesia ditempatkan pada urutan ke 80 dari 140 negara. Hal ini menunjukkan pilar infrastruktur masih memerlukan peningkatan guna mencapai nilai indeks daya saing yang lebih baik.

Tabel 1.1 : Indeks Daya Saing Global (GCI) Indonesia (2005 – 2015)

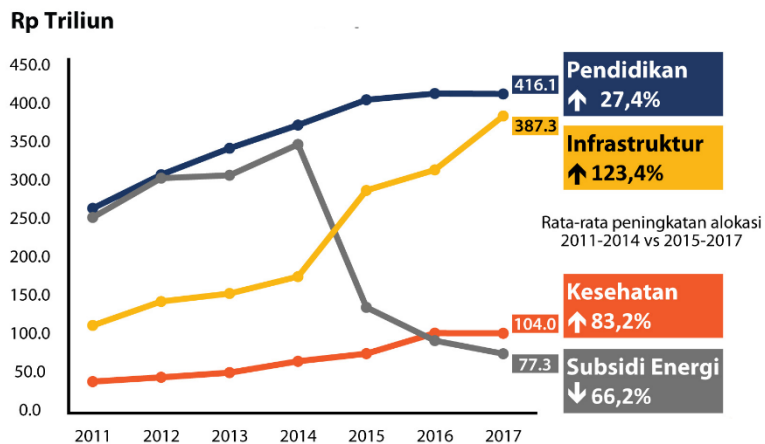
Tahun	Global competitiveness Index (GCI)	1 : Institusi	2 : Infrastruktur	3 : Makroekonomi	4 : Kesehatan dan Pendidikan Dasar	5 : Pendidikan Tinggi dan Keampilan	6 : Efisiensi Pasar untuk Barang	7 : Efisiensi Pasar untuk Pekerja	8 : Pengembangan pasar finansial	9 : Kesiapan Teknologi	10 : Ukuran Pasar	11 : Bisnis	12 : Inovasi
2005	4,0	3,7	3,4	4,5	4,9	3,7	4,0	3,9	4,1	2,8	5,1	4,0	3,4
2006	4,2	3,7	2,8	4,8	5,4	3,8	4,7	4,3	4,2	2,8	5,4	4,3	3,5
2007	4,2	3,9	2,7	4,6	5,3	4,0	5,1	4,7	4,6	3,0	5,2	4,6	3,6
2008	4,3	3,9	3,0	4,9	5,3	3,9	4,7	4,6	4,5	3,0	5,1	4,5	3,4
2009	4,3	4,0	3,2	4,8	5,2	3,9	4,5	4,3	4,3	3,2	5,2	4,5	3,6
2010	4,4	4,0	3,6	5,2	5,8	4,2	4,3	4,2	4,2	3,2	5,2	4,4	3,7
2011	4,4	3,8	3,8	5,7	5,7	4,2	4,2	4,1	4,1	3,3	5,2	4,2	3,6
2012	4,4	3,9	3,8	5,7	5,7	4,2	4,3	4,1	4,1	3,6	5,3	4,3	3,6
2013	4,5	4,0	4,2	5,8	5,7	4,3	4,4	4,0	4,2	3,7	5,3	4,4	3,8
2014	4,6	4,1	4,4	5,5	5,7	4,5	4,5	3,8	4,5	3,6	5,3	4,5	3,9
2015	4,5	4,1	4,2	5,5	5,6	4,5	4,4	3,7	4,2	3,5	5,7	4,3	3,9

Tabel 1.2 : Kualitas Infrastruktur di Indonesia dari peringkat GCI 2015-2016

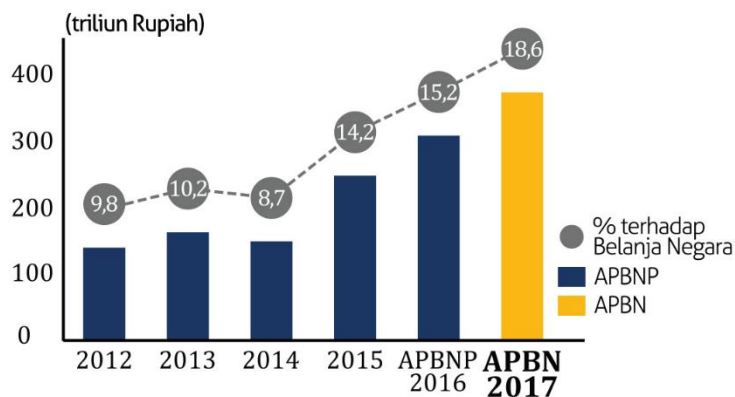
Indikator	Peringkat Dunia dari 140 negara	Nilai
Kualitas keseluruhan	81	3,8
Kualitas infrastruktur jalan	80	3,7
Kualitas infrastruktur Kereta Api	43	3,6
Kualitas infrastruktur pelabuhan	82	3,8
Kualitas infrastruktur transportasi udara	66	4,4

Terkait perbaikan kondisi infrastruktur, selama ini kendala yang dihadapi adalah masalah pendanaan dan permasalahan hukum. Arah kebijakan pemerintah melalui APBN 2016 dan 2017 terhadap pembangunan infrastruktur terfokus pada percepatan pembangunan infrastruktur yang efektif dan efisien untuk mendukung kegiatan sektor-sektor strategis ekonomi serta mengurangi kesenjangan ekonomi dan spasial. Sebagai konsekuensinya, anggaran peningkatan infrastruktur menjadi meningkat signifikan (Gambar 1.1 dan 1.2). Tercatat, dalam APBN 2017 ini, anggaran infrastruktur untuk ekonomi meningkat menjadi 378,3 trilyun rupiah (total anggaran infrastruktur ekonomi, sosial dan dari sebelumnya di tahun 2016 sebesar 307,1 trilyun rupiah. Meskipun anggaran belanja sudah meningkat, namun jika dibandingkan dengan rasio

terhadap produk domestik bruto (PDB), alokasi belanja pemerintah untuk pembangunan infrastruktur pemerintah masih dibawah 5 % yaitu angka idela untuk rasio anggaran infrastruktur terhadap PDB. Gambar 1.3 menjelaskan rasio anggaran infrastruktur terhadap dari tahun 2005 hingga 2012. Rasio ini relatif rendah jika dibandingkan dengan negara lain seperti China dan India, yang masing-masing mencapai 5,3% dan 7,3% dari PDB.



Gambar 1.1 : Peningkatan alokasi anggaran belanja infrastruktur di APBN (2011 - 2017).
 Sumber: Kementerian Keuangan (<http://www.kemenkeu.go.id>)



Gambar 1.2 : Grafik belanja infrastruktur di APBN (2012 - 2017) dan prosentasenya terhadap Belanja Negara. Sumber: Kementerian Keuangan (<http://www.kemenkeu.go.id>)



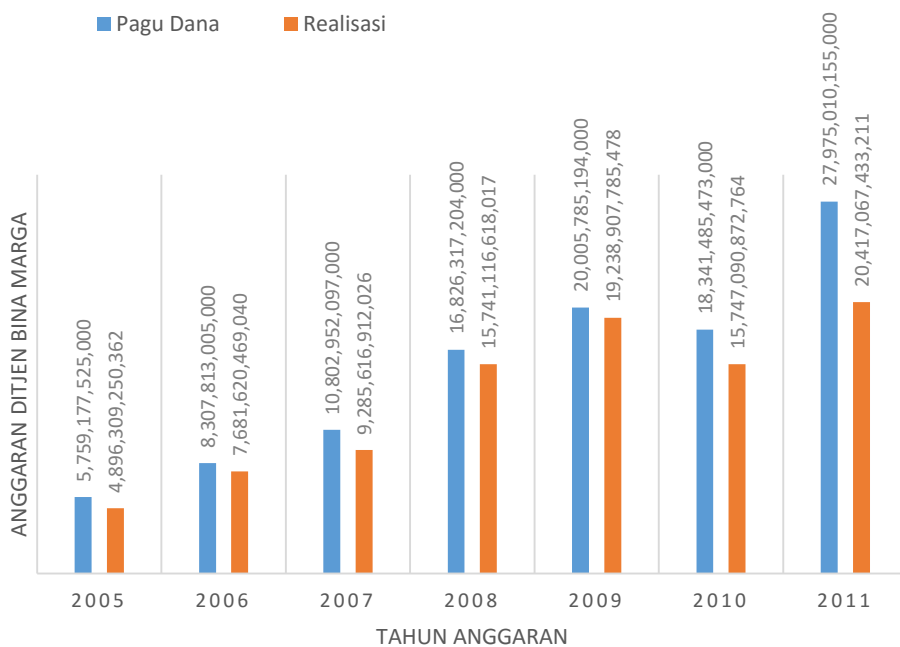
Gambar 1.3 : Perkembangan Rasio Infrastruktur di APBN terhadap Pendapatan Domestik Bruto (PDB)

Dengan demikian, upaya pembenahan kondisi infrastruktur disadari peran penting dalam mengurangi kesenjangan pendapatan dan dampak jangka panjangnya bagi PDB per kapita. Perbaikan infrastruktur memiliki kontribusi dalam meningkatkan produktivitas dan diharapkan mampu mendukung pertumbuhan ekonomi dalam jangka panjang. Merujuk pada publikasi *World Development Report* (World Bank, 1994), infrastruktur berperan penting dalam meningkatkan pertumbuhan ekonomi di mana pertumbuhan ekonomi yang lebih tinggi dijumpai pada wilayah dengan tingkat ketersediaan infrastruktur yang mencukupi. Identifikasi terhadap program pembangunan infrastruktur di beberapa negara menyimpulkan bahwa pada umumnya, program ditargetkan dalam jangka menengah dengan fokus pada peningkatan kebutuhan dasar dan konektivitas manusia, mulai dari air, listrik, energi, hingga transportasi (jalan raya, kereta api, pelabuhan, dan bandara). Weil (2009) juga menyatakan bahwa disparitas ketersediaan kapital fisik dan human capital berperan dalam menjelaskan adanya perbedaan pertumbuhan ekonomi antar negara.

Pada era sebelum ini, evaluasi dan pemeliharaan kerusakan jalan hanya ditumpukan kepada kegiatan perbaikan pada lokasi-lokasi kerusakan tanpa melalui proses pemeliharaan (*maintenance*) dan pengawasan (*controlling*). Saat ini, ketika ruang dan jaringan infrastruktur sudah semakin luas dan mempertimbangkan faktor ekonomi dan biaya pemeliharaan jalan yang semakin mahal, maka diperlukan suatu sistem manajemen jalan (*pavement management system*, PMS) yang mampu mengevaluasi

konstruksi secara baik dari tahapan penilaian kondisi jalan hingga pada langkah-langkah rehabilitasi, Penggunaan PMS bertujuan supaya jalan memiliki umur layanan yang lebih lama.

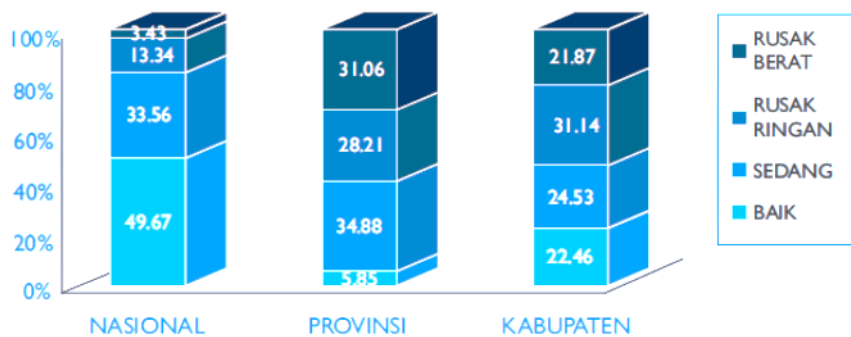
Permasalahan yang terjadi di Indonesia yang terkait dengan proses manajemen jaringan jalan adalah ketidakseimbangan besaran dana evaluasi dan pemeliharaan yang disediakan oleh pemerintah terhadap jaringan jalan yang ada. Hal tersebut menyebabkan makin panjangnya daftar tunggu (*back-log*) pemeliharaan jalan akibat terbatasnya anggaran yang tersedia, Masalah keterbatasan anggaran memang merupakan masalah klasik yang selalu terjadi berkaitan dengan kegiatan pemeliharaan jalan. Meskipun alokasi dana pemeliharaan infrastruktur dalam APBN untuk sektor jalan sudah mengalami peningkatan dari tahun ke tahun (Gambar 1.4) namun jika dibandingkan dengan total panjang jalan yang harus ditangani, alokasi dana program pemeliharaan jalan tidak dapat mencukupi kebutuhan pemeliharaan.



Gambar 1.4 : Pagu dan realisasi anggaran di Ditjen Bina Marga untuk infrastruktur jaringan jalan di Indonesia dari tahun 2005 – 2011

Kondisi ini diperparah lagi dengan semakin meningkatnya beban kendaraan yang harus ditanggung oleh jalan yang berkaitan erat dengan meningkatnya jumlah kendaraan dan tonase beban per kendaraan. Data Ditjen Bina Marga Tahun 2010

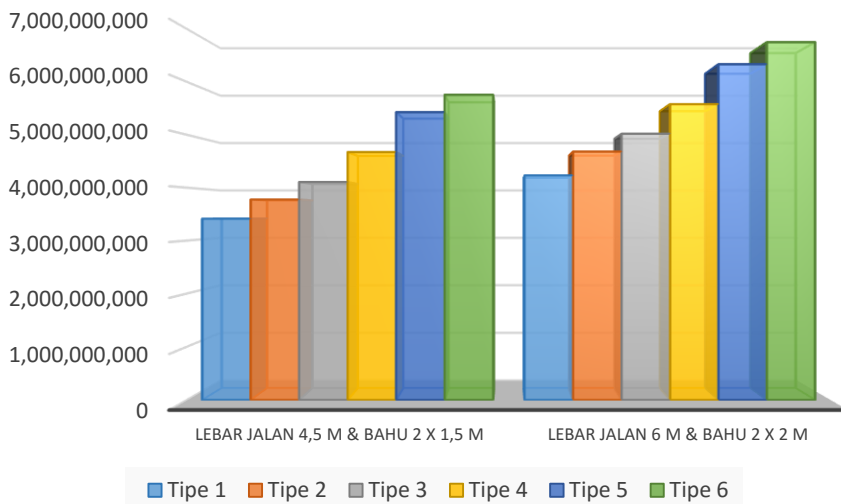
(Warta Anggaran, 2012) tentang kondisi jalan di Indonesia (Gambar 1.5) menunjukkan bahwa dari panjang jalan nasional 38,569 km, ditemukan 3,34% mengalami rusak berat; 33,56% rusak ringan; 33,56% dalam kondisi sedang; dan sisanya 49,67% dalam kondisi baik, Untuk jalan provinsi, dari total panjang 48,966 km, didapati 31,06% dalam kondisi rusak berat; 28,21% rusak ringan; 34,88% kondisi sedang; dan sisanya 5,85% dalam kondisi baik. Adapun untuk jalan kabupaten/kota dengan 358,713 km, ditemukan: 21,87% dalam kondisi rusak berat; 31,14% rusak ringan; 24,53 kondisi sedang; dan sisanya 22,46% dalam kondisi baik.



Gambar 1.5 : Kondisi jaringan jalan di Indonesia tahun 2010
(Warta Anggaran, 2012)

Jika dapat disederhanakan, dengan menggunakan asumsi-asumsi sederhana tahun 2012, biaya kegiatan pemeliharaan rutin dan periodik (berkala) jalan per kilometernya per tahun dibutuhkan masing-masing sebesar Rp.26 juta dan Rp. 350 juta. Dari jumlah jaringan jalan provinsi sepanjang 446,248 km, setiap tahunnya rata-rata harus dilakukan pemeliharaan rutin 52% dan pemeliharaan berkala 48%, Maka secara kasar kebutuhan dana program pemeliharaan yang ideal dari luas jaringan jalan yang ada adalah sekitar Rp. 81 trilyun tiap tahunnya, Untuk jalan nasional saja kebutuhan tersebut sekitar Rp. 7,29 trilyun (9% dari Rp, 37,17 trilyun) dan khususnya untuk jalan kabupaten saja lebih dari Rp. 50 trilyun. Dengan kemampuan pemerintah dalam APBN saat ini yang terbatas, tentunya alokasi dana program pemeliharaan jalan tidak dapat mencukupi kebutuhan pemeliharaan yang diperlukan.

Belum lagi, biaya rekonstruksi apabila kondisi jalan sudah memasuki masa akhir pelayanan semakin meningkat dari tahun ke tahun. Gambar 1.6 memberikan deskripsi biaya rekonstruksi untuk dua tipe jalan dengan lebar perkerasan masing-masing 4,5 m dengan bahu jalan 2 x 1,5 m dan 6,0 m dengan bahu jalan 2 x 2,0 m. Gambar 6 membagi biaya rekonstruksi pada beberapa tipe beban jalan, yaitu tipe 1 (hingga 0,5 juta ESAL), tipe 2 (hingga 1 juta ESAL), tipe 3 (hingga 2 juta ESAL), tipe 4 (hingga 2,5 juta ESAL), tipe 5 (hingga 5 juta ESAL) dan tipe 6 (hingga 20 juta ESAL). Kebutuhan riil tersebut jauh lebih besar dari pada kemampuan negara menyediakan dana program pemeliharaan rutin dan periodik serta program rekonstruksi.



Gambar 1.6 : Kondisi jaringan jalan di Indonesia tahun 2010

Dalam bidang prasarana jalan raya ini, Indonesia masih tertinggal dari negara lain. Data yang dipublikasikan oleh World Economic Forum (WEF) pada 2011 menunjukkan bahwa perkerasan jalan di Indonesia masih digolongkan dalam kategori buruk di Asia. WEF (2011) mencatat bahwa kondisi infrastruktur jalan raya Indonesia menempati posisi ke-83 dari 142 negara. Posisi Indonesia berada di bawah negara tetangga, seperti Singapura (2), Malaysia (18) dan China (54) (Lakip Ditjen Bina Marga, 2011). Dengan adanya gambaran ini, makin jelas bahwa pembiayaan sektor

jalan melalui mekanisme anggaran sudah tidak dapat lagi memenuhi kebutuhan riil sektor jalan dan konsekuensi back-log pemeliharaan jalan dari waktu ke waktu semakin membesar dan merupakan permasalahan yang serius dalam melaksanakan kegiatan pemeliharaan jalan yang baik di Indonesia. Aspek-aspek tersebut merupakan kenyataan yang tidak bisa dihindari dan perlu dijadikan pendorong untuk mencari upaya-upaya terobosan dalam sistem manajemen anggaran dan penerapan teknologi pemeliharaan jalan di Indonesia yang inovatif sehingga pembinaan jalan dapat dilakukan secara efektif dan efisien.

1.2 TEKNOLOGI EVALUASI PERKERASAN JALAN

Di dalam proses manajemen jalan, tahapan-tahapan untuk menjalankan sistem manajemen yang biasa dilaksanakan mengikuti rangkaian proses sebagai berikut :

1. Studi jaringan jalan
2. Pengukuran kondisi perkerasan jalan
3. Prediksi kondisi perkerasan jalan di masa yang akan datang
4. Manajemen tingkat jaringan jalan
5. Manajemen tingkat proyek rehabilitasi jalan

Dari kelima tahapan di atas, tahapan yang paling penting di dalam sistem manajemen perkerasan adalah kemampuan untuk melakukan pengukuran kondisi perkerasan saat ini dan memprediksi depresiasi kekuatannya di masa yang akan datang (Shahin, 1994). Untuk melakukan tahapan pengukuran kondisi perkerasan jalan, proses identifikasi (*identification*), penilaian (*assessment*) dan evaluasi (*evaluation*) struktur perkerasan jalan harus diprogramkan secara terpadu. Dalam proses penilaian kekuatan struktur jalan raya diperlukan suatu metode pengukuran nilai struktural (kekuatan atau modulus bahan) setiap lapisan perkerasan jalan raya yang cepat, ekonomis, efisien dan efektif,

Pada perkembangannya, metode pengukuran struktural bahan perkerasan jalan dapat diklasifikasikan ke dalam dua kategori berdasarkan cara pengambilan data dan perilaku

kerja terhadap benda ujinya. Pertama, dikenali sebagai metode pengujian merusak (*destructive testing*, DT). Metode DT biasa dikenal sebagai metode konvensional yang melibatkan kerja lapangan dan laboratorium yang memerlukan pembiayaan tinggi dan waktu yang lama. Berbagai rangkaian kegiatan yang dilakukan dalam metode ini meliputi pengambilan benda uji melalui pengeboran (*core drilling*), perbaikan lubang jalan akibat pengambilan sampel, pemadatan ulang, pengujian benda uji di laboratorium dan proses analisis data. Pekerjaan lapangan tersebut juga dapat memberikan dampak langsung atau gangguan terhadap perjalanan kendaraan/lalu lintas. Metode kedua, dikenal sebagai metode pengujian tidak merusak (*non-destructive testing*, NDT). Metode ini mampu mengukur karakter struktural bahan perkerasan melalui pengamatan perilaku defleksi dan perpindahan partikel yang diakibatkan oleh beban statik maupun dinamik. Secara umum, keunggulan metode NDT dibandingkan metode DT adalah proses pengujiannya yang cepat dan tidak menimbulkan kerusakan pada struktur perkerasan jalan raya. Metode NDT yang digunakan saat ini pada perkerasan jalan, diantaranya *Falling Weight Deflectometer* (FWD), *Light Weight Deflectometer* (LWD), *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Impact Echo* (IE), *Infrared Thermography*, *Intelligent Compactor* dan *Seismic Pavement Tests*; terus berkembang mengikuti perkembangan teknologi mekatronik dan elektronika, dinilai telah mampu mendapatkan hasil evaluasi yang lebih akurat dibandingkan dengan pengujian konvensional laboratorium (misalnya pengujian Marshall, modulus resilien). Selain itu, pengujian NDT merupakan suatu pengujian yang lebih ekonomis disebabkan dalam pengujian ini tidak diperlukan pekerjaan pengambilan dan penyimpanan benda uji. Schmitt dkk. (2013) telah memberikan perbandingan dan skoring terhadap beberapa pengujian NDT (*Falling Weight Deflectometer* (FWD), *Light Weight Deflectometer* (LWD), *Ground Penetrating Radar* (GPR), *Impact Echo* (IE), *Infrared Thermography*, *Intelligent Compactor* dan *Seismic Pavement Tests*) di perkerasan jalan. Tabel 1.3 menjelaskan atribut pembanding untuk delapan (8) jenis pengujian NDT beserta urutan skor dan perangkingan berdasarkan karakteristik peralatan dan aplikasi di

lapangannya. Karakteristik peralatan di sini merupakan komponen peralatan dan kompleksitas penggunaan alatnya.

Tabel 1.3 : Perbandingan peralatan NDT untuk pengujian perkerasan jalan

Parameter Pembeding	FWD	LWD	GPR	IE	Infrared Thermography	Intelligent Compactor	Seismic Tests
Prinsip pengoperasian	Pembebanan impuls, vibrasi dan statik untuk mengukur nilai kekakuan (modulus) lapisan perkerasan	Pembebanan impuls terkontrol untuk menentukan nilai kekakuan di bawah beban.	Pantulan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi tebal lapisan perkerasan dan anomalnya	Perambatan gelombang seismik untuk mendapatkan nilai resonan lapisan (tebal perkerasan)	Tingkat radiasi panas dan emisinya	Getaran yang dikontrol untuk mendapatkan kekakuan material perkerasan jalan	Perambatan gelombang seismik dan/atau ultrasonik untuk mendeteksi karakteristik material perkerasan jalan
Ouput & Indikator Hasil	Modulus elastisitas	Modulus elastisitas	Tebal lapisan, kepadatan, kelembaban bahan	Tebal lapisan, delaminasi	Segragasi suhu	Indek kekakuan, nilai pemadatan	Modulus elastisitas, tebal lapisan, kelembaban, delaminasi, rasio redaman (damping)
Peralatan Tes	Trailer, kendaraan dengan perlengkapan komputer	Peralatan beban sederhana, komputer	Kendaraan, pengirim gelombang pulse, antena, komputer	Unit akuisisi, komputer	Kamera infra-red, sensor bar	Pemadatan roller	Sumber gelombang, penerima (sensor) gelombang dan unit akuisisi-sensor
Portabilitas	Cukup baik	Sangat baik	Baik	Sangat baik	Sangat baik	Baik	Sangat baik
Kompleksitas (Kerumitan Operasional)	Cukup kompleks	Sederhana	Cukup kompleks	Sederhana	Sederhana	Sederhana	Cukup kompleks
Waktu yang diperlukan dalam pengujian	± 2 menit	1 hingga 5 menit	Berterusan	1 menit	Berterusan	Berterusan	< 1 menit
Batasan Lingkungan	Sensitif terhadap temperatur perkerasan	Sensitif terhadap temperatur perkerasan	Sensitif terhadap permukaan dan lapisan perkerasan yang basah	Tidak dianjurkan pada suhu tinggi	Adanya gradasi temperatur yang tinggi disyaratkan	Tidak dipengaruhi oleh kelembaban dan suhu permukaan jalan	Dianjurkan pada perkerasan jalan dengan suhu 32 hingga 120° F
Reliabilitas	Baik	Cukup baik	Baik	Rendah	Sangat Baik	Sangat Baik	Baik
Protokol pengujian	ASTM D4695-08	ASTM E2538-07	ASTM D4748-06	ASTM C1383-04	ASTM D4788-07 ASTM E1543-06	Belum ada	ASTM STP 1375 (2000)

Sumber: Schmitt, dkk, 2013

Dari penilaian kemudahan peralatan dan efektivitas aplikasi di lapangan yang terkait dengan kemanfaatan peralatan dalam proyek konstruksi perkerasan jalan, Schmitt, dkk (2013) menyimpulkan dari kedelapan peralatan NDT, dipilih tiga (3) pengujian NDT yang mempunyai skor terbaik, karakteristik peralatan masing-masing yang khusus dan memiliki kemanfaatan-kemudahan-akurasi dalam aplikasinya di lapangan, yaitu:

- a) *Infrared Thermography*, peralatan NDT ini berfungsi untuk menentukan suhu pada campuran aspal pada *mixing plant*, truk pengangkut material, pengoperasian paver dan kalibrasi *Pave-IR*.
- b) *Ground Penetrating Radar*, sistem GPR digunakan untuk menentukan tebal dan kepadatan lapisan perkerasan jalan setelah pekerjaan konstruksi.
- c) *Seismic Pavement Test*, peralatan ini dapat menentukan kondisi struktural perkerasan jalan, sifat volumetrik campuran aspal yang dihasilkan dari koreksi modulus seismik, dan dapat memprediksi nilai modulus bahan dan korelasi kepadatan materialnya. Di sisi lain, pengujian NDT berbasis seismik ini juga dapat mengukur sifat dinamik bahan, seperti rasio redaman (*damping*) dan faktor pengurangan gelombang (*atenuasi*).

1.3 PERKEMBANGAN TEKNOLOGI NDT BERBASIS SEISMIK

Salah satu NDT yang memanfaatkan perambatan gelombang seismik permukaan dikenal sebagai metode analisis gelombang permukaan atau *surface-waves analysis method/testing*. Metode pengujian gelombang permukaan ini merupakan salah satu jenis pengujian yang berpotensi untuk menentukan parameter kekakuan dinamik jalan berupa modulus elastisitas bahan perkerasan pada setiap kedalaman lapisan perkerasan. Prinsip metode analisis gelombang permukaan adalah memanfaatkan karakteristik perambatan gelombang permukaan dari sumber mekanik buatan untuk menilai kecepatan gelombang geser yang merupakan representasi dari nilai kekakuan bahan.

Saat ini, terdapat tiga jenis pengujian berdasarkan analisis gelombang permukaan secara langsung (*direct measurement*) yang diimplementasikan untuk penilaian perkerasan jalan yaitu *Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)*, *Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW)* dan *Countinuous Source Analysis of Surface Waves (CSW)*. Ketiga pengujian tersebut memiliki konsep yang sama, namun memiliki konfigurasi yang berbeda dalam perekaman dan analisis gelombang permukaan. Secara umumnya,

ketiga pengujian tersebut memiliki keunggulan yaitu sifat pengujiannya yang tidak memberikan sebarang kerusakan pada struktur. metode ini murah dalam pelaksanaannya dan cepat untuk proses analisis hasilnya. Metode SASW telah dikembangkan sejak tahun 1980 di *University of Texas at Austin*, Amerika Serikat. Perkembangan metode SASW meliputi sejumlah pengujian dan riset yang telah dijalankan untuk berbagai jenis infrastruktur dan penggunaan teknik analisis yang diautomasi sepenuhnya.

Aplikasinya yang pertama telah dilakukan oleh Nazarian (1984) dan Nazarian & Stokoe (1984) yang menjelaskan penggunaan SASW kepada analisis kekakuan tanah dan struktur timbunan jalan pada beberapa lokasi jalan di Texas, USA. Dalam studinya, hasil pengukuran SASW telah dibandingkan dengan pengujian seismik lubang bersilang (*cross hole*) dan diperoleh hasil bahwa pengujian SASW mempunyai korelasi linier positif terhadap hasil pengujian seismik cross-hole. Meskipun demikian, teknik SASW yang dikembangkan masih menggunakan algoritma analisis yang sederhana sehingga proses inversi profil kekakuan bahan masih sederhana yang belum merepresentasikan profil kedalaman yang lebih detail. Pengujian yang sama selanjutnya dilakukan oleh Hiltunen & Woods (1988) yang menghasilkan korelasi yang memuaskan dari kedua metode pengujian tersebut.

Beberapa riset lainnya mengenai penggunaan teknik SASW telah menghasilkan model pengujian empiris lapangan, seperti studi karakteristik berbagai fondasi bangunan yang dilakukan oleh Madshus & Westerdhal (1990) dan Stokoe *dkk.* (1994), Penelitian yang dilakukan menghasilkan korelasi-korelasi empiris parameter dinamik gelombang dengan berbagai variasi kekuatan fondasi. Studi ini dilanjutkan oleh Matthews *dkk.* (1996) dengan melakukan pengukuran lapangan dan perbandingan nilai kekakuan tanah meliputi modulus geser dan modulus elastisitas tanah menggunakan metode SASW dan metode seismik lainnya. Hasil studinya menunjukkan bahwa nilai korelasi antara teknik SASW dengan teknik seismik lainnya adalah baik. Sementara itu,

penilaian nilai modulus dinamik struktur beton menggunakan metode SASW juga pernah diawali oleh Rix *dkk.* (1990); Cho (2002); Rosyidi (2012). Selain itu, kajian pendeteksian tebal dan parameter dinamis lapisan pada struktur motar semen menggunakan SASW juga pernah dilakukan oleh Cho & Lin (2001).

Untuk bidang kajian tanah, Kim *dkk.* (2001) telah melakukan studi pengukuran kepadatan tanah menggunakan metode analisis spektrum gelombang permukaan di laboratorium. Hasil studi yang dilakukan menerbitkan suatu korelasi empiris kecepatan gelombang geser (V_s) dan kepadatan kering tanah (*dry density*) dengan koefisien determinasi yang baik. Rosyidi *dkk.* (2016) juga telah mengembangkan studi Kim *dkk.*(2001) dengan membangun peralatan uji labroatorium dan uji lapangan kepadatan tanah menggunakan korelasi kecepatan gelombang fase dan kecepatan gelombang geser. Hanya saja, studinya masih terbatas pada dua jenis tanah lempung dan tanah berpasir.

Studi penggunaan spektrum gelombang permukaan pada struktur fondasi balas jalan kereta api dilakukan oleh Zagyapan & Fairfield (2002). Hasil yang diperolehnya menunjukkan bahwa profil distribusi modulus agregat lapisan balas sehingga lapisan tanah dasar dapat diobservasi dengan baik dengan metode seismik SASW. Hal ini memperluas spektrum pemanfaatan dan aplikasi teknik SASW dalam bidang infrastruktur jalan.

Pada perkembangannya, penggunaan analisis spektrum gelombang permukaan telah diperluas untuk mendeteksi anomali pada berbagai struktur sub-permukaan, diantaranya oleh Haupt (1977), Dravinsky (1983), Curro (1983) dan Gucunski *dkk.* (1996, 2000). Gucunski *dkk.* (2000) telah melakukan pengamatan ketidakhomogenan dan gangguan (*obstacles*) dalam suatu struktur tanah menggunakan metode analisis spektrum gelombang permukaan (SASW). Studi tersebut dilanjutkannya dengan menggunakan spektrum wavelet gelombang permukaan untuk mendeteksi

ketidakseragaman lapisan dimana hasilnya menguatkan kajian sebelumnya bahwa teknik spektrum gelombang seismik mempunyai potensi besar dalam mendeteksi anomali dan ketidakhomogenan dalam ruang struktur.

Teknik *Multi-channel analysis of surface waves* (MASW) dikembangkan dari metode SASW dengan menggunakan satu set sensor gelombang yang biasanya terdiri dari 12 atau lebih sensor. Teknik MASW ini masih relatif baru dan dikembangkan pertama kali oleh Park *dkk.* (1999a,b,c) dari Kansas Geological Survey (KGS). Penggunaannya dalam investigasi geoteknik telah dilakukan oleh beberapa studi seperti Miller *dkk.* (1999) untuk pemetaan batuan bawah tanah (*bedrock*); Xia *dkk.* (1999a) untuk mengestimasi profil sub-permukaan dengan inversi gelombang Rayleigh; Xia *dkk.* (1999b) untuk menginvestigasi sedimen tak terkonsolidasi. Sementara itu, Foti (2004) telah menggunakan teknik MASW untuk menentukan rasio pelemahan (*damping ratio*) tanah, sedangkan Ryden *dkk.*, (2004) lebih mengembangkan studi MASW untuk menentukan profil yang tak beraturan misalnya pada profil jalan.

Metode lain dari teknik gelombang permukaan adalah metode *continuous sources analysis of surface wave* (CSW). Perbedaan khusus CSW terhadap SASW dan MASW adalah terletak pada sumber gelombangnya. CSW menggunakan sumber gelombang mekanik menerus yang dideteksi menggunakan dua sensor atau lebih. Teknik CSW sangat berguna apabila diimplementasi pada lokasi tanah yang sangat lunak (kapasitas daya dukung sangat rendah) misalnya lempung laut (*marine clay*). Pembahasan lanjut mengenai kedua teknik seismik ini yaitu MASW dan CSW dapat merujuk pada Rosyidi (2013).

1.4 TEKNIK SEISMIK UNTUK PERKERASAN JALAN

Berbagai studi mengenai potensi penggunaan teknik SASW untuk evaluasi kualitas jalan telah dimulai sejak tahun 1984 (Nazarian, 1984; Nazarian & Stokoe, 1984). Dalam perkembangan studi yang dilakukan oleh banyak peneliti dalam bidang SASW,

ditemui bahwa ada dua aspek penting untuk pengembangan teknik SASW yaitu aspek pengembangan teori dan aspek pengembangan metode pengukuran. Untuk aspek teori, Gucunski (1991) melakukan studi awal untuk mengkaji reaksi impuls beban yang akibat variasi berbagai bentuk beban pada media berlapis. Hasil penelitiannya memberikan kontribusi dengan ditemukannya superposisi mode gelombang yang dipengaruhi oleh gelombang mekanik tubuh (Primer dan Sekunder). Berbagai pengaruh gelombang ini selanjutnya diselesaikan dengan pendekatan model perambatan gelombang mekanik 2 D dan 3 D dengan menggunakan persamaan kekakuan dinamik untuk media berlapis yang direkomendasikan oleh Kausel & Rössset (1981). Penelitian mengenai pengaruh mode gelombang dan pendekatannya melalui model 2 D dan 3 D ini selanjutnya diteruskan oleh Mera *dkk.* (1991), Al Syahea (1994) dan Joh (1995). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pengaruh pencampuran gelombang mekanik dapat didekati dengan pemodelan 3 D, dimana model ini dianalisis lebih realistis dibandingkan pendekatan 2 D. Penelitian terbaru mengenai penggunaan SASW untuk manajemen perkerasan jalan dilakukan oleh Rosyidi *dkk.* (2002, 2003, 2004, 2005a,b, 2007a,b, 2008), Rosyidi (2004, 2009, 2010, 2012). Secara khusus, peneliti Rosyidi & Ikhsan (2005), Rosyidi & Taha (2004, 2012), Rosyidi & Siegfried (2009) dan Rosyidi (2004, 2009, 2012) telah melakukan kajian teoritik, pemodelan dan pengujian empiris untuk berbagai jenis jalan di Indonesia dan beberapa segmen jalan di Malaysia. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa analisis data dalam teknik SASW untuk profil media berlapis dengan perbedaan nilai kekakuan yang tidak ekstrim, model inversi sederhana (Richart *dkk.*, 1970) dan model perambatan gelombang 2 D dapat digunakan untuk membangun kurva penyebaran gelombang fase terhadap frekuensi. Namun untuk profil yang lebih kompleks, penggunaan model 3 D adalah sangat dianjurkan. Di sisi lain, Rosyidi (2004) juga mengungkapkan bahwa untuk menjalankan pengujian SASW di perkerasan jalan banyak kesulitan analisis data gelombang terutama untuk memastikan mode perambatan gelombang Rayleigh yang sesungguhnya. Oleh karena itu, rekomendasi yang diberikan oleh Rosyidi (2004) adalah perlunya simulasi pemodelan untuk

berbagai bentuk-bentuk mode perambatan dalam proses analisis data seismik. Kekeliruan yang sering muncul adalah interpretasi mode gelombang R yang bergerak di suatu profil uji dimana akan berpengaruh pada tingkat keberhasilan pada proses inversi (*inversion process*) kurva dispersi kecepatan gelombang geser. Proses tersebut secara signifikan dipengaruhi oleh interpretasi dan pemisahan kecepatan gelombang fase kelompok (*group velocity*) menjadi kelompok gelombang fase (*phase velocity*). Tambah lagi, Rosyidi (2004) mengemukakan bahwa faktor penentu lain dalam keberhasilan analisis SASW adalah pemilihan bentuk dan frekuensi gelombang yang diperlukan dalam analisis. Kekeliruan ini akan berpengaruh pada hasil akhir berupa dispersi kecepatan gelombang geser. Secara analitik dan numerik, Rosyidi dkk. (2008) dan Rosyidi (2009) telah mengusulkan metode wavelet untuk menyelesaikan permasalahan teknik analisis mode gelombang dalam metode SASW.

Rosyidi dkk. (2007a) juga mengusulkan suatu teknik *integrated-SASW* untuk evaluasi dan penilaian jalan. Teknik pengembangan ini memiliki keunggulan mampu menganalisis kekuatan bahan jalan dan rasio pelemahan struktur jalan secara simultan. Rosyidi dkk. (2007a) dalam mengembangkan teknik tersebut menggunakan skala model fisik perkerasan jalan untuk jenis perkerasan AC dan ATB. Dari studi yang dilakukan oleh Rosyidi dkk. (2007a), telah dikembangkan sistem dan teknik SASW dengan konfigurasi multi-sensor gelombang permukaan untuk evaluasi bahan struktur jalan. Sistem SASW multi-sensor tersebut diperbarui lagi dengan dikembangkan menjadi analisis tomografi oleh Rosyidi (2015). Kelebihan dari teknik multi-sensor tomografi adalah kemampuan pencitraan 2 D untuk mendeteksi daya dukung bahan perkerasan jalan dan anomalnya yang dapat diidentifikasi dengan mudah dan akurat.

Studi lain dari pengembangan teknik SASW untuk evaluasi jalan adalah pengujian empirik yang dilakukan oleh Rosyidi dkk. (2016). Hasil penelitiannya menghasilkan hubungan empiris yang kuat antara parameter seismik berupa kecepatan gelombang

permukaan dan tubuh dengan kepadatan tanah di laboratorium. Hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa teknologi perambatan gelombang seismik untuk evaluasi perkerasan jalan memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut lagi supaya teknologi tersebut semakin inovatif, ekonomi dan mudah untuk diaplikasikan bagi pengawasan kualitas perkerasan jalan di Indonesia. Dalam bahasan bab-bab selanjutnya, prinsip dasar pengujian seismik, bagaimana cara penggunaannya, konfigurasi lapangan untuk aplikasi di perkerasan jalan dan studi kasus aplikasi pengujian seismik pada perkerasan jalan, dijelaskan secara terperinci.

2

KONSEP GELOMBANG PERMUKAAN: DASAR TEORI DAN PENDEKATAN MATEMATIK

2.1 PENGANTAR

Gelombang seismik permukaan merupakan salah satu tipe gelombang mekanik yang dihasilkan dari penyaluran energi mekanik pada media padat yang elastik. Mengenal konsep (teori) dan filosofi fisik mengenai perambatan gelombang seismik permukaan akan menghantarkan pada pemahaman mengenai teknik analisis spektrum gelombang permukaan (SASW). Oleh karena itu, pada bagian ini, dipaparkan konsep dasar perambatan gelombang seismik permukaan yang dilengkapi dengan ilustrasi grafis dan latar belakang teori yang dituliskan dalam persamaan dasar (*fundamental equation*) matematikanya. Diawali dengan penjelasan mengenai sifat-sifat mekanik gelombang seismik permukaan yang unik dan khas, selanjutnya dibahas bagaimana perubahan pola gelombang permukaan yang merambat pada media yang homogen maupun heterogen (berlapis). Sifat-sifat mekanik gelombang menjadi dasar penting dalam menentukan peralatan pendeteksi gelombang, konfigurasi pengukuran di lapangan, metode analisis dan pemodelan yang diperlukan, dalam aplikasi teknik SASW ini untuk evaluasi perkerasan jalan. Persamaan-persamaan matematika gelombang seismik diturunkan dari kajian dasar terhadap sifat-sifat mekanik gelombang permukaan.

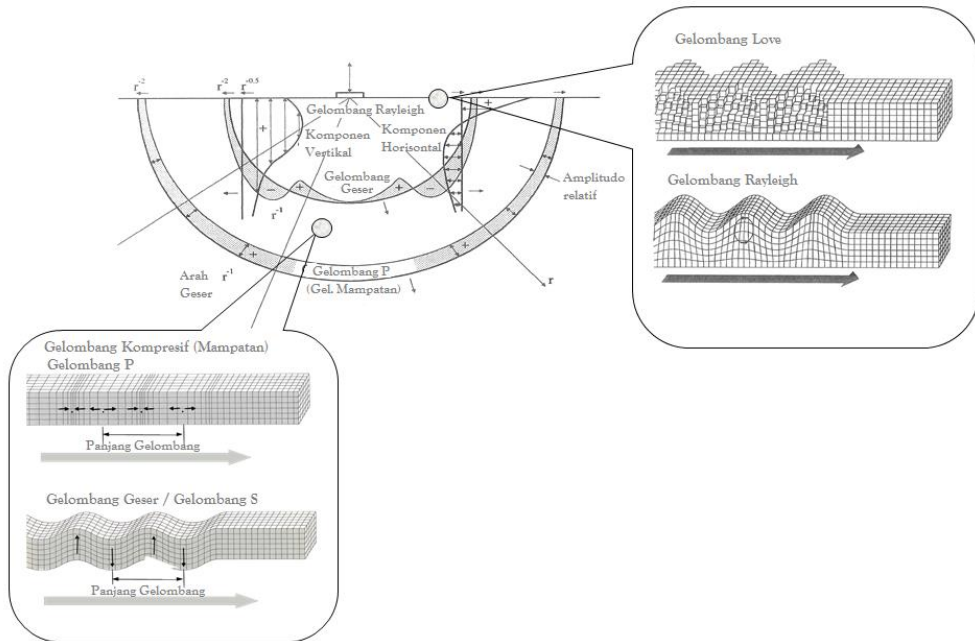
Persamaan matematika dan turunannya ini menjadi dasar pemodelan inversi kurva dispersif gelombang permukaan dalam analisis data di teknik SASW.

2.2 SIFAT MEKANIK GELOMBANG SEISMIK PEMUKAAN

1. BENTUK DAN ARAH PERAMBATAN GELOMBANG

Gelombang seismik permukaan dikenali juga sebagai gelombang mekanik (*mechanical waves*). Identitas ini diberikan karena sifat rambatan energi dalam gelombang permukaan berasal dari proses mekanik. Dijelaskan oleh Bolt (1976), bahwa gelombang mekanik merupakan rambatan (perpindahan) energi yang berproses secara mekanis dari suatu sumber mekanik pada suatu media yang padat (*solid*) dan elastik. Perpindahan energi mekanik menghasilkan perpindahan partikel (*particle displacement*) yang selanjutnya membentuk formasi gelombang yang sesuai dengan bentuk rambatannya dibagi dalam dua golongan, yaitu gelombang tubuh (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Jika energi mekanik dihasilkan di permukaan media, perpindahan partikel atau perambatan energi gelombang tubuh memiliki arah vertikal berpenetrasi ke dalam media sedangkan gelombang permukaan bergerak secara menyebar pada sub-permukaan media (*sub-surface*). Gambar 2.1 memberikan ilustrasi mengenai bentuk dan arah perambatan dari kedua gelombang tersebut. Berdasarkan bentuknya, gelombang tubuh, dapat digolongkan lagi ke dalam gelombang tubuh utama (*primary, P*) dan gelombang tubuh sekunder (*secondary, S*).

Gelombang P. Gelombang ini bergerak dengan perubahan partikel-partikelnya yang searah dengan perambatan gelombangnya.

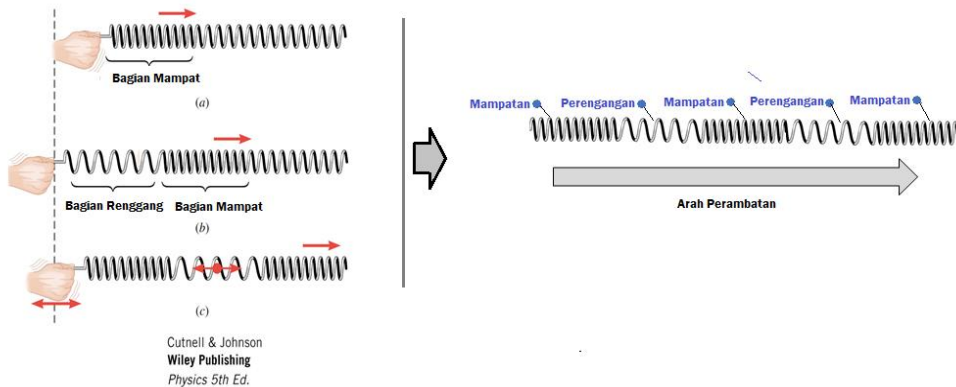


Gambar 2.1: Perambatan gelombang mekanik tubuh dan permukaan pada media yang padat, homogen dan elastik.

Dapat diilustrasikan dalam Gambar 2.2, bentuk rambatan partikel energi gelombang P terdiri dari dua bagian, yaitu bagian mampatan (*compression*) dan bagian perenggangan (*rarefaction*). Ilustrasi mudahnya melakukan percobaan mampatan dan peregangan pada pegas dalam arah longitudinal.

- Bagian mampatan, *compression*, merupakan bagian gelombang P dimana panjang jarak yang memisahkan partikel berpindah besarnya kurang dari posisi keseimbangan partikel dalam rambatannya. Ketika bagian mampatan ini dilepaskan, maka partikel akan bergerak kembali pada posisi yang seimbang, selanjutnya partikel yang bergerak akan memampatkan segmen lainnya yang berdekatan dengan bagian yang mampatan yang terjadi sebelumnya. Demikian, seterusnya pergerakan partikel pada bagian mampatan berlangsung sepanjang rambatan energi di media.
- Bagian perenggangan, *rarefaction* atau *stretching*, merupakan segmen gelombang P dimana partikel-partikel bergetar terpisah dari posisi keseimbangannya secara

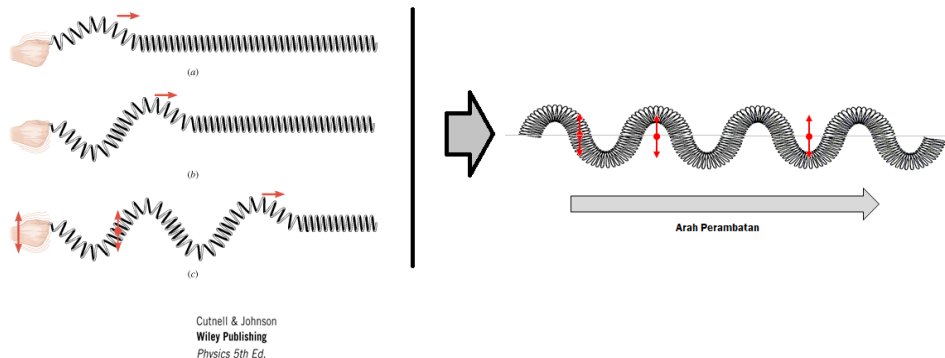
longitudinal. Mekanisme perenggangan seterusnya terjadi sepanjang media sebagaimana mekanisme mampatan di atas berlangsung.



Gambar 2.2: Konsep perambatan gelombang P: bagian mampatan dan bagian perenggangan pada arah perambatan longitudinal

Gelombang S. Partikel energi gelombang S melakukan perpindahan dengan arah yang tegak lurus terhadap arah perambatan gelombangnya. Dalam kajian dinamika tanah, gelombang S juga dikenal sebagai gelombang geser (*shear wave*). Bentuk perpindahan partikel gelombang S dapat digambarkan seperti bentuk gelombang sinusoidal. Gambar 2.3, memberikan ilustrasi grafis bentuk gerak partikel gelombang S terhadap arah perpindahan energinya. Gelombang S, dapat dibagi lagi berdasarkan komponen vektor perambatan, yaitu gelombang dengan komponen vertikal (S_V) dan komponen horizontal (S_H).

Gelombang permukaan dapat digolongkan lagi berdasarkan bentuk perambatannya kepada dua jenis, yaitu gelombang *Love* (gelombang L) dan gelombang *Rayleigh* (gelombang R). Pada suatu media yang homogen dan elastik, gelombang permukaan Rayleigh saja yang mungkin dapat dihasilkan dari suatu sumber mekanik, sedangkan untuk media yang berlapis, dapat dihasilkan perambatan kedua jenis gelombang permukaan Rayleigh dan Love secara bersamaan (Al Shaye, 1994).

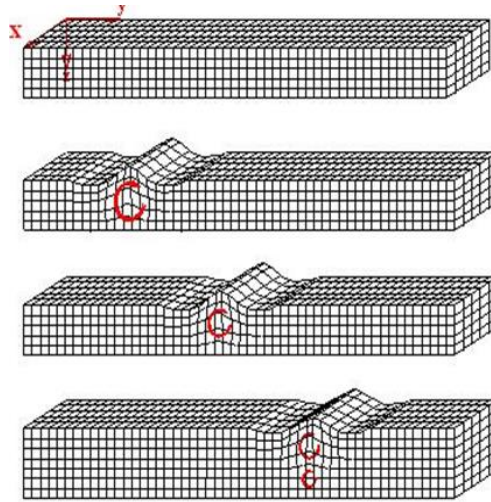


Gambar 2.3: Konsep perambatan gelombang S

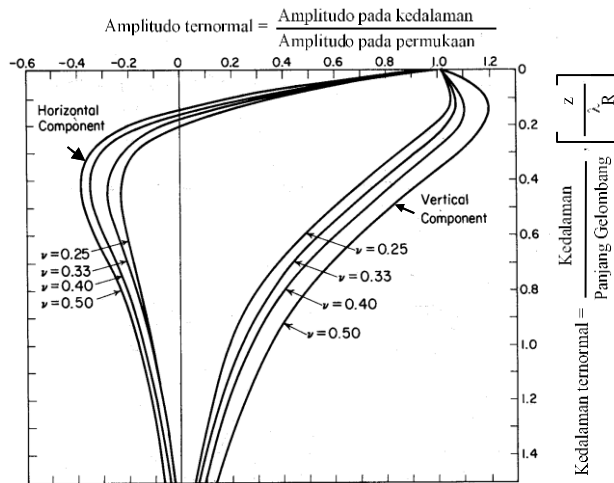
Gelombang L. Gelombang Love hanya akan dapat terjadi apabila energi mekanik merambat pada media yang memiliki lapisan dengan kekakuan rendah dengan ketebalan yang tipis yang berada di atas lapisan dengan kekakuan yang lebih tinggi. Gelombang L dihasilkan dari energi yang terperangkap (komponen gelombang S_H) dalam lapisan permukaan akibat pantulan yang berulang.

Gelombang R. Sepanjang permukaan tanah yang elastik, isotropik dan homogen, gelombang permukaan R akan merambat dengan jumlah energi seismik yang terbesar yaitu 67 % (Miller & Pursey 1955) dari seluruh energi suatu sumber mekanik berupa berbentuk lingkaran yang dibebankan secara vertikal. Gelombang permukaan R juga dikenali sebagai gelombang Rayleigh-Lamb atau ground roll. Perambatan partikel gelombang ini bergerak dengan membentuk pola gelombang silindris elips di sepanjang permukaan suatu media (Gambar 2.4). Pada permukaan media, bentuk pergerakan partikel adalah retrograde dan semakin bertambah kedalaman, bentuk partikel menjadi berubah kebalikannya (prograde). Perpindahan partikel gelombang R dalam bentuk silindris elips terbagi dalam dua yaitu arah vertikal dan horizontal. Komponen partikel pada arah vertikal memiliki amplitudo yang lebih besar berbanding komponen horizontal. Amplitudo partikel gelombang selanjutnya akan berkurang searah dengan

penetrasi energi rambatannya ke dalam media (Gambar 2.5). Gambar 2.5 menunjukkan perubahan amplitudo yang dinormalisasi (rasio amplitudo) gelombang R terhadap kedalaman untuk beberapa nilai nisbah Poisson bahan.



Gambar 2.4 : Pola perambatan gelombang Rayleigh (R)

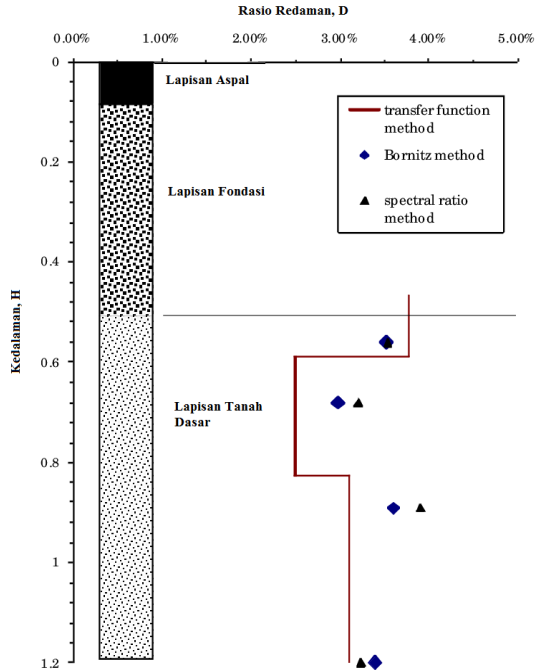


Gambar 2.5 : Variasi perpindahan partikel gelombang Rayleigh (R) pada arah vertikal dan horizontal terhadap kedalaman media

Dari gambar tersebut juga dapat dijelaskan bahwa perambatan gelombang R tidak dipengaruhi oleh sifat bahan lapisan pada kedalaman lebih dari satu kali panjang gelombangnya. Artinya, penetrasi gelombang R secara vertikal dalam suatu media cenderung efektif untuk penetrasi maksimal dengan nilai satu panjang gelombangnya. Gelombang R dengan panjang gelombang yang lebih besar dapat berpenetrasi lebih dalam dibandingkan panjang gelombang yang pendek. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa fenomena ini hanya berlaku untuk media yang hampir sepenuhnya elastik dan homogen, sedangkan untuk media yang heterogen (berlapis) sifat penetrasi gelombang R bersifat menyebar dan sangat dipengaruhi oleh frekuensinya.

2. SIFAT PEREDAMAN GELOMBANG PERMUKAAN

Kepadatan energi setiap gelombang seismik akan berkurang searah dengan gerak rambatannya dari suatu sumber gelombang. Pengurangan energi ini diukur melalui pengurangan amplitudo gelombang dimana fenomena ini dikenal sebagai redaman geometrik (*geometrical damping*). Amplitudo gelombang tubuh berkurang dalam proporsi rasio $1/r$ (dengan r = jarak dari sumber gelombang), sedangkan nilai redaman geometrik (pengurangan amplitudo) gelombang permukaan R pada proporsi $1/\sqrt{r}$. Pada media yang heterogen (berlapis), sifat redaman gelombang R bersifat heterogen (dipengaruhi oleh frekuensi). Kombinasi sifat gelombang R yaitu memiliki transmisi energi mekanik terbesar (67 % dari total energi yang dirambatkan) dan memiliki kecepatan redaman yang lebih lambat dibandingkan gelombang tubuh, maka analisis perambatan gelombang R memiliki potensi besar untuk dikembangkan untuk menentukan rasio redaman bahan di media berlapis. Gambar 2.6 menunjukkan contoh profil pengukuran rasio redaman material dari hasil pengukuran seismik di lapangan berdasarkan atenuasi gelombang R pada perkerasan jalan. Dari profil rasio redaman ditunjukkan bahwa rasio redaman geometrik per lapisan material jalan dapat diketahui dengan menganalisis rasio pengurangan amplitudo gelombang R.



Gambar 2.6 : Profil rasio redaman Variasi perpindahan partikel gelombang Rayleigh (R) pada profil perkerasan jalan

3. SIFAT DISPERSIF GELOMBANG PERMUKAAN

Pada media elastik dan homogen, kecepatan gelombang R adalah konstan dan tidak dipengaruhi oleh frekuensi. Pada keadaan ini, kecepatan gelombang R (V_R) dapat diukur melalui persamaan:

$$V_R = f L_R \quad (2.1)$$

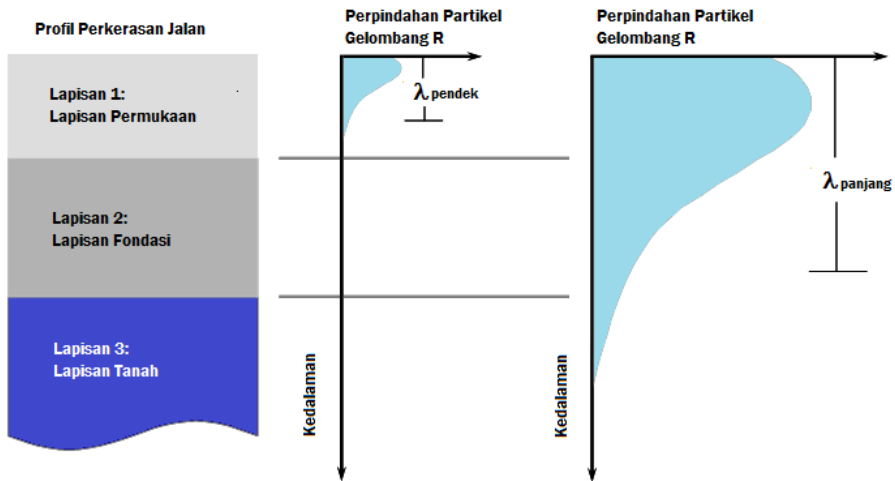
dengan :

f = frekuensi dalam Hz

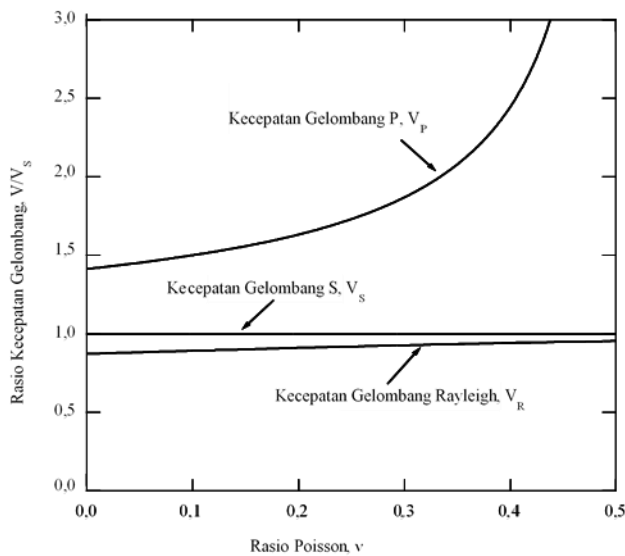
L_R = panjang gelombang R dalam m

Frekuensi dan panjang gelombang merupakan fungsi proporsional terbalik, gelombang dengan frekuensi yang lebih rendah (dengan panjang gelombang yang lebih panjang) dapat masuk ke tanah lebih dalam dibandingkan gelombang berfrekuensi tinggi

(dengan panjang gelombang pendek). Dengan kata lain, gelombang frekuensi rendah dapat memberikan informasi bahan untuk lapisan yang lebih dalam sedangkan frekuensi tinggi digunakan untuk lapisan di sekitar permukaan (Gambar 2.7).



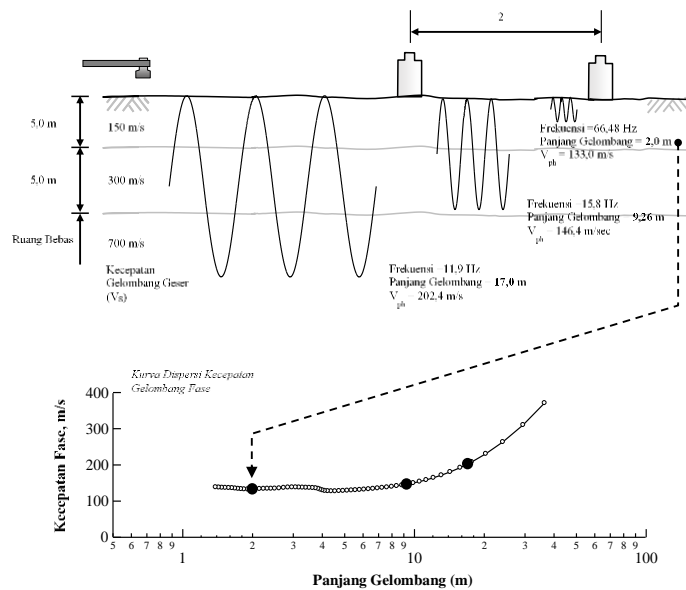
Gambar 2.7 : Sifat penetrasi gelombang R terhadap fungsi panjang gelombang



Gambar 2.8 : Hubungan antara rasio V_p dan V_s terhadap rasio Poisson pada beberapa kecepatan gelombang seismik

Gelombang R merambat dalam kecepatan 86 hingga 95 % dari kecepatan gelombang S untuk nilai rasio *Poisson* dari 0 hingga mendekati nilai 0,5. Gambar 2.8 menggambarkan rasio kecepatan gelombang R terhadap gelombang P dan S. Secara umum, kecepatan gelombang R lebih rendah dibandingkan dengan gelombang P dan S, dengan besaran kecepatan yang mendekati gelombang S; kecuali untuk nilai rasio *Poisson* 0,5.

Gelombang R dicirikan sebagai mode natural atau dasar yang perambatannya pada permukaan sesuatu media dihasilkan oleh penggabungan gelombang P dan komponen tegak gelombang S (gelombang SV). Pada media dengan sistem yang berlapis dimana sifat elastik berubah sesuai dengan kedalaman, kecepatan gelombang R selanjutnya tergantung pada nilai frekuensinya. Fenomena ini yang disebut sebagai dispersif (*dispersion*). Gambar 2.9 berikut ini menunjukkan bagaimana gelombang R merambat pada media yang berlapis. Kecepatan fase yang dihasilkan bersifat menyebar (dispersif) dengan nilai kecepatan yang bervariasi yang tergantung dari frekuensi dan panjang gelombang yang dirambatkan.



Gambar 2.9 : Fenomena dispersi kecepatan gelombang fase (R) terhadap panjang gelombang dan frekuensinya pada media yang elastik dan berlapis

Berdasarkan sifat dispersif inilah gelombang R digunakan sebagai media untuk mengevaluasi profil kekakuan bawah permukaan tanah melalui pengujian lapangan analisis spektrum gelombang permukaan atau dikenal sebagai metode SASW. Selain itu, pertimbangan lain penggunaan gelombang R dalam pengujian material adalah kemudahan gelombangnya untuk dihasilkan dan dideteksi pada permukaan bumi atau suatu media padat.

Gelombang R pada frekuensi ultrasonik adalah digunakan untuk mendeteksi lokasi retak dan bentuk kerusakan lain (*imperfections*) dalam bahan contohnya pada struktur aluminium and komposit lamina (Kim *dkk.* 2007), struktur beton terbakar (Colombo & Felliceti, 2007) dan pengawasan kondisi struktur pada kabel yang digunakan untuk struktur beton pre-stress dan struktur jembatan kabel gantung (*cable-stayed*) serta kabel suspensi (Rizzo *dkk.*, 2007). Gelombang R berfrekuensi rendah yang dihasilkan dari peristiwa seismik juga telah digunakan dalam bidang seismologi untuk pencitraan interior bumi (Yoshizawa & Kennett, 2002; Spetzler, *dkk.*, 2002; Xia *dkk.*, 2006). Pada wilayah frekuensi menengah, gelombang R berguna dalam teknik geofisik dan geoteknik untuk karakteristik tanah. Metode seismik yang dikembangkan dalam bidang tersebut berbasis dispersif geometrik gelombang R yang penyelesaiannya digunakan solusi inversi berbasis sinyal gelombang seismik yang direkam melalui sumber gelombang aktif seperti beban berat dijatuhkan, pemukul atau palu, ledakan kecil bahkan beberapa peneliti menggunakan mikrotremor (Trifunac *dkk.*, 1999; Ulusay *dkk.*, 2004).

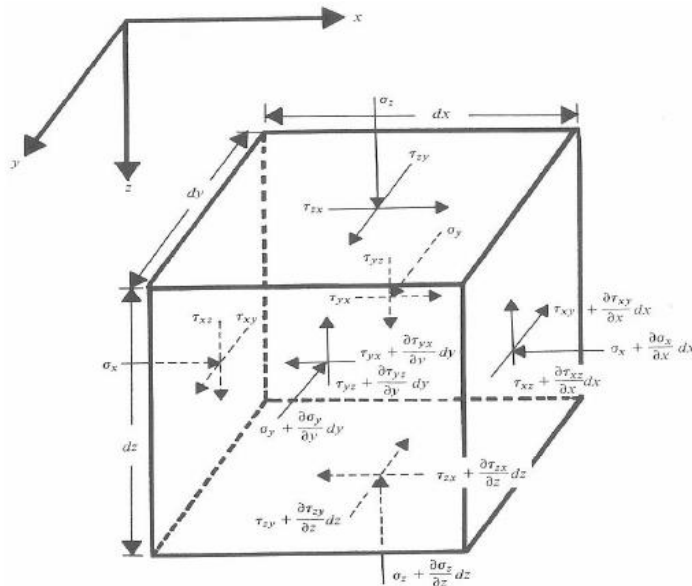
Aplikasi metode seismik berbasis gelombang permukaan R seperti sebagaimana dijelaskan di atas; memerlukan suatu teknik inversi untuk mendapatkan nilai perambatan gelombang S dari sebaran gelombang fase (R) dengan mempertimbangkan pengaruh interfensi gelombang lain apabila merambat pada media yang heterogen. Masalah ini melibatkan pendekatan matematik dan teknik inversi yang kompleks.

Dasar-dasar teori perambatan gelombang permukaan dijelaskan secara umum dalam bagian di bawah ini.

2.3 PENDEKATAN MATEMATIKA DALAM GELOMBANG SEISMIK

1. PERSAMAAN UMUM PERAMBATAN GELOMBANG SEISMIK

Persamaan umum gelombang R diturunkan dari penurunan persamaan simpangan tiga dimensi (3 D) pada suatu sistem media padat yang ditransformasikan kepada bentuk potensial skalar (Φ) dan potensial vektor (Ψ). Fungsi potensial simpangan digunakan sebagai pemisah antara pengaruh dilatasi dan putaran. Selain itu, guna menurunkan persamaan kecepatan gelombang Rayleigh perlu diasumsikan dalam daerah luasan persegi (*plane*) x - y dengan sumbu z (Gambar 2.10).



Gambar 2.10 : Penurunan fungsi tegangan untuk model perambatan gelombang mekanik pada media yang elastik dan isotropik (Sumber: Das 1993)

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (2.2)$$

Untuk sumbu y dan z dengan cara yang sama dapat diperoleh:

$$\left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (2.3)$$

$$\left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (2.4)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan kesetimbangan partikel. Untuk menganalisis persamaan gerak pada sistem partikel, Norwood (1979) memberikan hubungan linear dengan hukum kedua Newton mengenai gerak partikel dalam persamaan (2.2), yang selanjutnya persamaannya dituliskan sebagai berikut:

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz = m a \quad (2.5)$$

dimana:

$$m = \text{berat elemen, sebagai } m = \rho (dx dy dz) \quad (2.6)$$

$$a = \text{fungsi akselerasi} = \text{turunan kedua dari simpangan arah } x = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right)$$

$$\left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) dx dy dz = \rho (dx dy dz) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (2.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2.8)$$

untuk persamaan gerak pada sumbu y dan z dapat dituliskan:

$$\rho \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) = \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (2.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) = \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) \quad (2.10)$$

Berdasarkan persamaan dasar di atas, dapat diturunkan suatu fungsi yang menyatakan fungsi simpanan gelombang R dengan kecepatan gelombang P dan S. Fungsi simpangan di atas yang ditinjau pada arah x and z dapat dinyatakan dalam fungsi potensial secara terpisah berikut ini:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (2.11)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2.12)$$

Untuk persamaan dilatasi arah xz ($\bar{\epsilon}$) dan perputaran pada luasan (*plane*) xy ($\bar{\omega}_y$) dapat difungsikan dari u dan w sebagai berikut:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.13)$$

$$\bar{\epsilon} = \nabla^2 \Phi \quad (2.14)$$

$$2\bar{\omega}_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.15)$$

$$2\bar{\omega}_y = \nabla^2 \Psi \quad (2.16)$$

dimana ∇^2 merupakan fungsi *Laplace* yang menyatakan fungsi $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

Dari persamaan gerak pada arah x dan z (Persamaan 2.8 dan 2.10), dapat diturunkan menggunakan memasukkan fungsi potensial dan dilatasi berikut ini:

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) = (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + G \nabla^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \quad (2.17)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi^2}{\partial t^2} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Psi^2}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Phi) + G \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Psi) \quad (2.18)$$

dan,

$$\rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) = (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) + G \nabla^2 \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \quad (2.19)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \Phi^2}{\partial t^2} \right) - \rho \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Psi^2}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2G) \frac{\partial}{\partial z} (\nabla^2 \Phi) - G \frac{\partial}{\partial x} (\nabla^2 \Psi) \quad (2.20)$$

Persamaan di atas dapat diselesaikan jika kedua sisinya merupakan nilai yang sebanding (Richart *dkk.*, 1970):

$$\rho \left(\frac{\partial \Phi^2}{\partial t^2} \right) = (\lambda + 2G) \nabla^2 \Phi \quad (2.21)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi^2}{\partial t^2} \right) = V_p^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.22)$$

dan,

$$\rho \left(\frac{\partial \Psi^2}{\partial t^2} \right) = G (\nabla^2 \Psi) \quad (2.23)$$

$$\left(\frac{\partial \Psi^2}{\partial t^2} \right) = V_s^2 (\nabla^2 \Psi) \quad (2.24)$$

dimana diketahui bahwa:

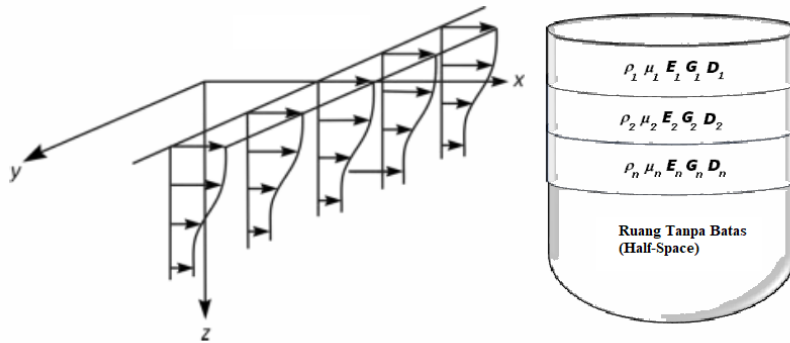
$$V_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2G)}{\rho}} \quad (2.25)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.26)$$

Persamaan-persamaan dasar di atas menjelaskan adanya hubungan antara simpangan gelombang Rayleigh dengan fungsi kecepatan gelombang utama (V_p) dan geser (V_s), yang bergerak dalam suatu luasan secara horizontal dalam bidang yang elastik, isotropik dan homogen.

2. Matrik Perpindahan Untuk Perambatan Gelombang 2 Dimensi

Penyelesaian perambatan gelombang Rayleigh pada media yang berlapis (heterogen secara menegak), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, dianggap bahwa setiap lapisan bersifat homogen dan isotropis, dengan beberapa parameter kepadatan massa (ρ), rasio Poisson (μ), nilai modulus elastik (E) atau modulus geser (G) dan rasio peredaman (D) dianggap sama sepanjang lapisan.



Gambar 2.11 : Profil media berlapis menegak dan homogenus mendatar

Gerak harmonik partikel gelombang tubuh dengan frekuensi ω , fungsi dilatasi dan perputaran dapat dituliskan dalam unit vektor untuk gerak harmonik keadaan tetap (*steady-state*) sebagai berikut (Mera dkk., 1991):

$$\bar{\epsilon} = A \exp \left[\frac{i \omega}{V_p} (V_p t - l x - m y - n z) \right] \quad (2.27)$$

$$\bar{\omega} = B \exp \left[\frac{i \omega}{V_s} (V_s t - l' x - m' y - n' z) \right] \quad (2.28)$$

dimana A dan B merupakan nilai variabel acak yang mewakili besaran amplitudo sedangkan nilai ekponensialnya merupakan fungsi dari keadaan tetap pada gerak harmonik gelombang dalam frekuensi (ω). Untuk menjelaskan perambatan gelombang

P dan S pada suatu dimensi ruang, susunan vektor (l, m, n) dan vektor (l', m', n') digunakan untuk mewakili unit vektor dalam koordinat kartesian yang diilustrasikan dalam Gambar 2.12 dan 2.13. Sehingga, bentuk simpangan gelombang P dan S dalam unit vektor dapat diturunkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u_p &= A_p l f_p \\ v_p &= A_p m f_p \\ w_p &= A_p n f_p \end{aligned} \tag{2.29}$$

dan

$$\begin{aligned} u_s &= (n' B_{ys} - m' B_{zs}) f_s \\ v_s &= (l' B_{zs} - n' B_{xs}) f_s \\ w_s &= (m' B_{xs} - l' B_{ys}) f_s \end{aligned} \tag{2.30}$$

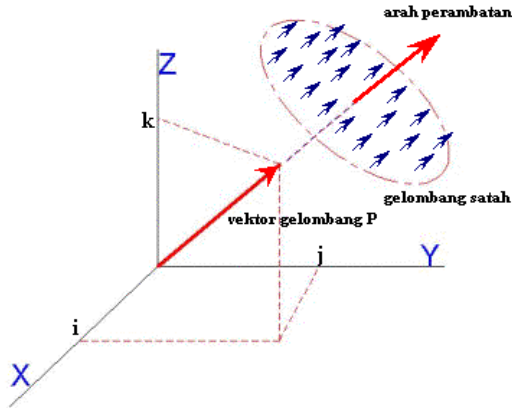
dimana

$$f_p = \exp \left[\frac{i \omega}{V_p} (V_p t - l x - m y - n z) \right] \text{ dan } A_p = A \frac{i V_p}{\omega} \tag{2.31}$$

$$f_s = \exp \left[\frac{i \omega}{V_s} (V_s t - l' x - m' y - n' z) \right] \tag{2.32}$$

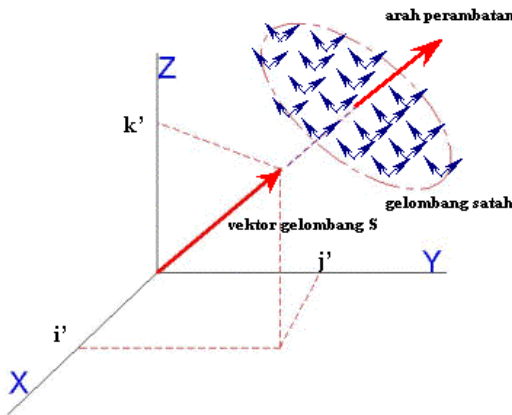
Persamaan 2.29 tersebut menunjukkan bahwa perambatan komponen gelombang P bergerak sepanjang arah perambatan gelombang dengan amplitudo A_p dan kecepatan V_p . Vektor simpangan gelombang S disusun dengan komponen tegak lurus kepada sumbu z , yang merupakan sebuah komponen datar (*plane wave*) yang tegak terhadap arah perambatan gelombangnya (Persamaan 2.30). Mera *dkk.* (1991) menyatakan kedua hubungan komponen tersebut dalam bentuk vektor A_{SH} dan A_{SV} sebagai berikut:

$$A_{SH} = \frac{B_{zs}}{\sqrt{l'^2 + m'^2}} \text{ dan } A_{SV} = \frac{l' B_{zs} - m' B_{xs}}{\sqrt{l'^2 + m'^2}} \tag{2.31}$$



Gambar 2.12 : Analisis bentuk vektor gelombang P

Bentuk gabungan simpangan komponen gelombang P dan S pada arah perambatannya bergerak dalam bentuk datar (arah xz), merupakan bentuk simpangan u dan w yang hanya tergantung kepada A_p dan A_{sv} saja disebut pergerakan datar dalam gerak harmonik yang dituliskan sebagai Persamaan 2.32 dan 2.33, sedangkan simpangan v hanya tergantung kepada A_{SH} saja dan mengarah keluar dari gerak datar.



Gambar 2.13 : Analisis bentuk vektor gelombang S

$$u = \left[l A'_p \exp\left(-\frac{i\omega}{V_p} nz\right) + l A_p \exp\left(\frac{i\omega}{V_p} nz\right) + n' A'_{sv} \exp\left(-\frac{i\omega}{V_s} n'z\right) \right]$$

$$- n' A_{sv} \exp\left(\frac{i\omega}{V_p} n' z\right) F(x,t) \quad (2.32)$$

$$w = \left[n A'_p \exp\left(\frac{i\omega}{V_p} n z\right) - n A_p \exp\left(\frac{i\omega}{V_p} n z\right) - l' A'_{sv} \exp\left(\frac{i\omega}{V_s} n' z\right) - l' A_{sv} \exp\left(\frac{i\omega}{V_s} n' z\right) \right] F(x,t) \quad (2.33)$$

dimana

A'_p dan A'_{sv} = amplitudo gelombang P dan SV yang merambat kepada arah positif sumbu z

$F(x,t)$ = nilai gerak harmonik gelombang dalam keadaan mantap serta beberapa anggapan parameter gelombang untuk media yang tiap lapisannya bersifat homogen dan isotropi

Pada kondisi di permukaan media, pada $z = 0$, tegangan yang bekerja adalah σ_z dan τ_{xz} (Persamaan 2.10) dan berreferensi kepada asumsi bahwa nilai l adalah tetap dan ω , A_p , A'_p , A_{sv} dan A'_{sv} dianggap sebagai konstanta serta diketahui bahwa:

$$r = \frac{in}{l} = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{kV_p}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_p}\right)^2} \text{ dan}$$

$$s = \frac{in'}{l'} = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{kV_s}\right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_s}\right)^2} \quad (2.34)$$

Maka simpangan dan tegangan di atas dapat disusun kembali dalam bentuk matrik sebagai pendekatan untuk memperoleh penyelesaian dari hubungan parameter-parameternya sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ iw \\ \tau_{xz} \\ i\sigma_z \end{bmatrix} = \mathbf{T} E_{(z)} \mathbf{A} \exp [i(\omega t - kx)] \quad (2.35)$$

disini,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & s & 1 & -s \\ -r & -1 & r & -1 \\ 2kGr & kG(1+s^2) & -2kGr & kG(1+s^2) \\ -kG(1+s^2) & -2kGs & -kG(1+s^2) & 2kGs \end{bmatrix}$$

$$E_{(z)} = \text{Diag} [e^{krz}, e^{ksz}, e^{-krz}, e^{-ksz}]$$

$$\mathbf{A} = \left[\frac{kV_p}{\omega} \mathbf{A}_p, \frac{ikV_s}{\omega} \mathbf{A}_{sv}, \frac{kV_p}{\omega} \mathbf{A}'_p, \frac{ikV_s}{\omega} \mathbf{A}'_{sv} \right]^T$$

Pada permukaan media ($z = 0$) suatu lapisan j , dianggap bahwa nilai $E_{(0)}$ sebagai matrik identitas dan dengan menghilangkan sebutan $\exp [i(\omega t - kx)]$, maka diperoleh hubungan nilai amplitudo gelombang R terhadap tegangan dan simpangan sebagai:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{S}_0 \end{bmatrix}_j = \mathbf{T}_j \begin{bmatrix} \mathbf{A}_j \\ \mathbf{A}'_j \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

dan fungsi simpangan dan tegangan di bawah lapisan, $z = h$, dinyatakan sebagai :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_h \\ \mathbf{S}_h \end{bmatrix}_j = \mathbf{T}_j \mathbf{E} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_j \\ \mathbf{A}'_j \end{bmatrix} = \mathbf{T}_j \mathbf{E} \mathbf{T}_j^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{S}_0 \end{bmatrix}_j = \mathbf{H}_j \begin{bmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{S}_0 \end{bmatrix}_j \quad (2.37)$$

dimana H_j diterjemahkan sebagai matrik perpindahan (*transfer matrix*) suatu lapisan media (Thompson, 1950 dan Haskell, 1953). Untuk menggunakan metode matrik perpindahan sebagai penyelesaian persamaan perambatan gelombang R di media yang berlapis, perlu diambil anggapan bahwa tidak ada perambatan gelombang yang melalui

ruang bebas di sumbu z positif ($A'_j = 0$) dan tidak adanya energi gelombang disalurkan di permukaan. Suatu *nontrivial solution* dari hubungan di atas dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{bmatrix} A_p \\ A_{SV} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} u_1^0 \\ w_1^0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

dimana matrik R adalah 4 x 4, dan

$$\det [R_{21}] = 0 \quad (2.39)$$

Persamaan di atas dikenal sebagai persamaan dispersif dan elemen pada matrik R adalah fungsi transeden dalam nomor gelombang dan domain frekuensi. Keunggulan pendekatan matematika menggunakan matrik perpindahan ini hanya mampu menyelesaikan permasalahan selama analisis numerik untuk persamaan disperse gelombang dilakukan dengan wilayah frekuensi rendah, misalnya untuk stratifikasi tanah yang relatif homogen. Matrik perpindahan juga hanya mampu menilai beberapa mode dari sebuah jenis gelombang yang merupakan bagian terpenting dalam memahami masalah dasar perambatan gelombang padamedia berlapis. Namun demikian, jika pemisahan antara mode fundamental dan mode tinggi pada pengukuran SASW tidak memungkinkan dilakukan, maka teori ini menjadi kurang tepat digunakan dalam analisis data gelombang.

3. MATRIK KEKAKUAN UNTUK PERAMBATAN GELOMBANG 2 DIMENSI

Kajian yang dilakukan oleh Kausel & Rössset (1981) menjelaskan bahwa persamaan penyebaran gelombang R dapat diturunkan melalui pendekatan matrik dengan mengubah bentuk perpindahan gelombang kepada hubungan vektor. Pendekatan yang dilakukannya untuk menurunkan persamaan penyebaran gelombang R dalam media berlapis adalah dengan menggunakan matrik kekakuan dinamik (*dynamic stiffness matrix*). Adapun ciri yang membedakan matrik kekakuan dengan matrik perpindahan adalah:

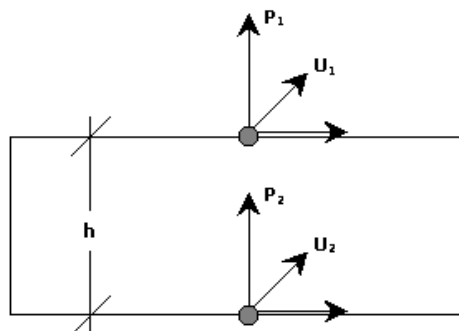
- Matrik kekakuan dinamik memasukkan fungsi perpindahan dan daya dalam domain frekuensi dan nomor gelombang menggunakan parameter kekakuan bahan pada permukaan atas dan bagian bawah suatu lapisan media.
- Fungsi respon gerak unit beban menegak dalam metode kekakuan untuk sistem media berlapis. Pendekatan analisis matrik kekakuan ini diturunkan dari inversi bagian matrik perpindahan yang dinyatakan sebagai (Kausel & Rössset, 1981):

$$\begin{bmatrix} S_o \\ S_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -H_{11} \cdot H_{12}^{-1} & H_{12}^{-1} \\ H_{22} \cdot H_{12}^{-1} \cdot H_{11} \cdot -H_{21} & -H_{22} \cdot H_{12}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_o \\ U_h \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Jika tegangan di atas (S_o) dan di bawah (S_h) lapisan adalah fungsi vektor daripada beban luar atas (P_1) dan bawah (P_2) sedangkan hasil inversi matrik perpindahan disebut sebagai nilai K dan perpindahan $U_o = U_1$ serta $U_h = U_2$ (Gambar 2.14), maka secara ringkas persamaan matrik kekakuan dapat dituliskan sebagai:

$$P = K U \quad (2.41)$$

disini K = matrik kekakuan dinamik lapisan dalam frekuensi dan nomor gelombang tertentu.



Gambar 2.14: Skematik beban luar sebagai tegangan dan perpindahan pada suatu lapisan

Kausel & Rössset (1981) merumuskan penyelesaian bentuk matrik kekakuan untuk gelombang P dan SV untuk koordinat kartesian dan silinder dalam bentuk tepat (*exact*) dan diskrit (*discrete*). Matrik kekakuan tepat dihitung berdasarkan kepada perubahan perpindahan dalam bentuk fungsi transenden, untuk nilai-nilai $\omega > 0$ dan $k > 0$ yang dinyatakan dalam :

$$K = 2 k G \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$K_{11} = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(C^r S^s - rs C^s S^r) & -(1-C^r S^s + rs S^r S^s) \\ -(1-C^r S^s + rs S^r S^s) & \frac{1}{r}(C^s S^r - rs C^r S^s) \end{bmatrix} - \frac{1+S^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$K_{12} = \frac{1-s^2}{2D} \begin{bmatrix} \frac{1}{s}(rs S^r - S^s) & -(C^r - C^s) \\ C^r - C^s & \frac{1}{r}(rs S^2 - S^r) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

K_{22} = sama sebagaimana matrik K_{11} dengan tanda diagonal tertutupnya diubah

$$K_{21} = K_{12}^T$$

Untuk matrik kekakuan bentuk setengah ruang diturunkan sebagai:

$$K = 2 k G \left[\frac{1-s^2}{2(1-rs)} \begin{Bmatrix} r & 1 \\ 1 & s \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{Bmatrix} \right] \quad (2.45)$$

disini,

$$C^r = \cosh krh \quad S^r = \sinh krh$$

$$C^s = \cosh ksh \quad S^s = \sinh ksh$$

$$D = 2(1 - C^r C^s) + \left(\frac{1}{rs} + rs \right) S^r S^s \quad (2.46)$$

h = tebal lapisan

Jika tebal lapisan adalah kecil secara relatif berbanding panjang gelombang, maka adalah mungkin untuk melinearkan fungsi-fungsi transendennya dengan mentransformasikan perpindahan dalam arah tegak. Selanjutnya penyelesaian perpindahan dan tegangan ditulis dalam bentuk analitik eksak pada arah horisontal dan bentuk polinomial ringkas dalam arah tegak (Kausel & Rössset, 1981; Mera *dkk.*, 1991). Matrik kekakuan untuk penyelesaian diskrit bagi suatu lapisan dan bentuk setengah ruang dapat dinyatakan dalam susunan:

$$K_m = A_m k^2 + B_m k + G_m - \omega^2 M_m \quad (2.47)$$

disini,

$$A = \frac{h}{6} \left\{ \begin{array}{cccccc} 2(\lambda + 2G) & \cdot & \cdot & \lambda + 2G & \cdot & \cdot \\ \cdot & 2G & \cdot & \cdot & G & \cdot \\ \cdot & \cdot & 2G & \cdot & \cdot & G \\ \lambda + 2G & \cdot & \cdot & 2(\lambda + 2G) & \cdot & \cdot \\ \cdot & G & \cdot & \cdot & 2G & \cdot \\ \cdot & \cdot & G & \cdot & \cdot & 2G \end{array} \right\} \quad (2.48)$$

$$B = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{cccccc} \cdot & \cdot & \lambda - G & \cdot & \cdot & -(\lambda + G) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \lambda - G & \cdot & \cdot & \lambda + G & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \lambda + G & \cdot & \cdot & -(\lambda - G) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -(\lambda + G) & \cdot & \cdot & -(\lambda - G) & \cdot & \cdot \end{array} \right\} \quad (2.49)$$

$$G = \frac{1}{h} \left\{ \begin{array}{cccccc} G & \cdot & \cdot & -G & \cdot & \cdot \\ \cdot & G & \cdot & \cdot & -G & \cdot \\ \cdot & \cdot & \lambda + 2G & \cdot & \cdot & -(\lambda + 2G) \\ -G & \cdot & \cdot & G & \cdot & \cdot \\ \cdot & -G & \cdot & \cdot & G & \cdot \\ \cdot & \cdot & -(\lambda + 2G) & \cdot & \cdot & \lambda + 2G \end{array} \right\} \quad (2.50)$$

$$M = \frac{\rho h}{6} \begin{Bmatrix} 2 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 2 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 2 & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & \cdot & \cdot & 2 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & 2 \end{Bmatrix} \quad (2.51)$$

disini:

λ = konstanta Lamé

ρ = kepadatan massa (*mass density*)

Apabila metode ini diterapkan kepada sistem yang lebih dari satu jenis lapisan, maka perlu disusun suatu matrik global. Matrik global kekakuan disusun secara bertindihan pada setiap node di muka lapisan satu kepada lapisan lainnya sehingga kepada lapisan setengah ruang. Gambar 2.15 menampilkan contoh susunan matrik global profil media berlapis dengan masing-masing lapisan merupakan matrik kekakuan 4 x 4.

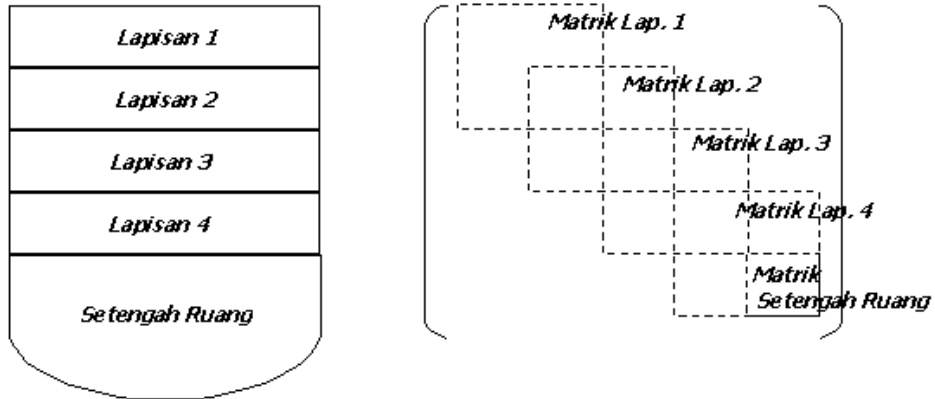
Untuk mendapatkan nilai perpindahan vektor beban luar $P(x,z,t)$ bagi sistem berlapis, komponen-komponennya diuraikan dalam transformasi Fourier seperti:

$$\bar{P}(x, z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, z, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.52)$$

$$\bar{\bar{P}}(k, z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x, z, \omega) e^{-ikx} dx \quad (2.53)$$

Seterusnya perpindahan pada domain $k-\omega$ dapat diselesaikan menggunakan persamaan:

$$\bar{\bar{U}}(k, z, \omega) = K^{-1} \bar{\bar{P}}(k, z, \omega) \quad (2.54)$$



Gambar 2.15: Model matrik global kekakuan untuk profil berlapis (Kausel & Rössset, 1981)

Perpindahan dalam domain frekuensi-ruang, $\bar{U}(x, z, \omega)$, dan perpindahan sebenarnya dalam domain masa-ruang, $U(x, z, t)$, dihitung menggunakan inversi transformasi Fourier sebagai:

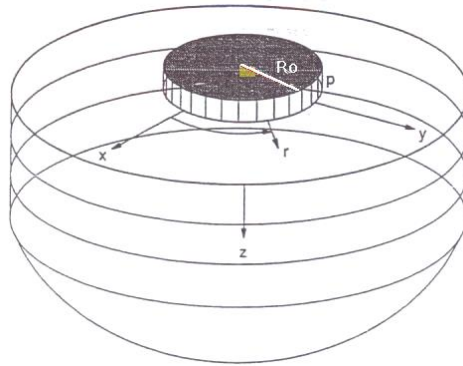
$$\bar{U}(x, z, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{U}(k, z, \omega) e^{-ikx} dk \quad (2.55)$$

$$U(x, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{U}(x, z, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.56)$$

4. MATRIK KEKAKUAN 3 D UNTUK SIMPANGAN GELOMBANG R

Kausel & Peak (1982) mengusulkan suatu penyelesaian analitik untuk gerak balas pada sensor gelombang yang diletakkan pada jarak yang berubah-ubah dengan sumber gelombang vertikal. Dalam kajiannya dimodelkan sebuah punca beban berpermukaan bulat yang menghasilkan gelombang permukaan berbentuk muka gelombang silinder dan gelombang tubuh berbentuk muka gelombang hemisfera. Apabila sumber mekanik gelombang *transient* diberikan pada permukaan media, gelombang akan merambat dengan membentuk luasan bulatan yang kecil. Sistem yang dibentuk adalah berdasarkan ruang setengah bulatan dengan permukaan lapisan teratas berbentuk

lingkaran berkoordinat silinder yang berdimensi tiga (3-D), sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 2.16.



Gambar 2.16: Model penyelesaian analisis 3 dimensi untuk media berlapis (Gucunski 1991)

Dalam analisisnya, penyelesaian sistem ini mampu menggabungkan seluruh komponen gelombang tegangan yang juga dikenali dengan bentuk penyelesaian 3 dimensi (3 D). Susunan umum perpindahan gelombang dan tegangan model 3 D pada lapisan permukaan suatu media dalam sistem koordinat silinder dinyatakan sebagai (Mera *dkk.*, 1991):

$$\begin{bmatrix} \bar{U} \\ \bar{S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cn & \cdot \\ \cdot & Cn \end{bmatrix}^T E_{(z)} A \exp(i\omega t) \quad (2.57)$$

disini, T, E(z) dan A adalah susunan matrik sebagai :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & s & 1 & -s \\ -r & -1 & r & -1 \\ 2kGr & kG(1+s^2) & -2kGr & kG(1+s^2) \\ -kG(1+s^2) & -2kGs & -kG(1+s^2) & 2kGs \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$E_{(z)} = \text{Diag} [e^{krz}, e^{ksz}, e^{-krz}, e^{-ksz}] \quad (2.59)$$

$$A = \left[\frac{kV_p}{\omega} A_p, \frac{ikV_s}{\omega} A_{sv}, \frac{kV_p}{\omega} A'_p, \frac{ikV_s}{\omega} A'_{sv} \right]^T \quad (2.60)$$

$C_n = C_n(kr)$, adalah merupakan fungsi silinder pada peringkat n dan juga merupakan jenis (*kind*) pertama, kedua atau ketiga dari fungsi transformasi Bessel atau Neumann atau Hankel. Faktor C_n merupakan bentuk matrik pada nomor gelombang dan nilai jari-jari yang dinyatakan sebagai (Kausel & Rössset, 1981):

$$C_n^{(kr)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_n}{\partial kr} & \frac{n}{kr} C_n & \cdot \\ \frac{n}{kr} C_n & \frac{\partial C_n}{\partial kr} & \cdot \\ \cdot & \cdot & -C_n \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

Persamaan di atas adalah pengembangan dari persamaan dasar sistem simpangan dan beban dinamik. Penyelesaian model 3 D bentuk simetri searah (*axisymmetric*) dapat dinyatakan dalam silinder koordinat yang nilai tegangan dan perpindahan pada permukaan yang horisontal dirumuskan dalam seri Fourier pada arah perputaran (θ) dan fungsi silinder pada arah radial (r). Seterusnya vektor beban (mewakili fungsi tegangan) pada permukaan media dapat dinyatakan dalam domain frekuensi-nomor gelombang yang ditransformasikan dari domain ruang sebagai :

$$\overline{PS}_{(k,n)} = a_n \int_{r=0}^{\infty} r \cdot C_n \int_{\theta=0}^{2\pi} Dn PS_{(r,\theta)} d\theta dr \quad (2.62)$$

disini,

$\overline{PS}_{(k,n)}$ = vektor beban dalam domain frekuensi dan nomor gelombang.

$PS_{(r,\theta)}$ = vektor beban dalam domain ruang yang komponennya dinyatakan dalam arah radial/jari-jari, tangen dan vertikal/tegak.

Faktor a_n bernilai $\frac{1}{2\pi}$ untuk $n = 0$ dan $\frac{1}{\pi}$ untuk $n \neq 0$,

$D_{n(n,\theta)}$ dinyatakan sebagai matrik $[\cos n \theta, -\sin n \theta, \cos n \theta]^T$ untuk susunan simetri dan $[\sin n \theta, \cos n \theta, \sin n \theta]$ untuk susunan anti simetri.

Gucunski (1991) mengambil bentuk fungsi Bessel (J_n) dari transformasi Hankel untuk menyatakan parameter C_n , selanjutnya bentuk matriknya dituliskan sebagai:

$$C_{n(kr)} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k} \left[\frac{\partial J_{n(kr)}}{\partial r} \right] & \frac{n}{kr} J_{n(kr)} & \cdot \\ \frac{n}{kr} J_{n(kr)} & \frac{1}{k} \left[\frac{\partial J_{n(kr)}}{\partial r} \right] & \cdot \\ \cdot & \cdot & -J_{n(kr)} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Jenis pertama fungsi Hankel (H^b) tingkat n digunakan untuk memodelkan perambatan gelombang dari ruang tak terhingga (*infinite*) menuju permukaan asal (*origin*). Manakala jenis kedua fungsi Hankel tingkat n digunakan untuk menganalisis pergerakan gelombang dari pusat kawasan (*center region*) menuju ke medan yang jauh (*far field*). Apabila diambil asumsi bahwa beban, $P_{s(r,\theta)}$, yang terjadi di permukaan sebagai beban tegak yang sama/seragam (P_o) yang membentuk luasan bulat dengan jari-jari (R_o) dan hanya bagian Fourier yang simetri saja yang bernilai nol ($n = 0$), maka bentuk beban dalam nomor gelombang dinyatakan sebagai (Gucunski, 1991):

$$\overline{P_s} = -P_o \int_{r=0}^{r=R_o} r \cdot J_{0(kr)} dr = -\frac{P_o \cdot R_o}{k} J_{1(kR_o)} \quad (2.64)$$

disini, P_o = beban tegak sama/seragam membentuk luasan bulat pada sistem.

Perpindahan gelombang horizontal, $u(k)$, dan vertikal, $w(k)$, dapat ditentukan menggunakan hubungan persamaan beban dan matrik kekakuan sebagai:

$$\overline{U_s} = K^{-1} \overline{P_s} \quad (2.65)$$

Dalam domain ruang, inversi transformasi Hankel diperlukan untuk menyusun perpindahan berdomain nomor gelombang pada arah perputaran. Persamaan umumnya dinyatakan sebagai (Mera *dkk.*, 1991) :

$$U_{s(r,\theta)} = \sum_{n=0}^{\infty} D_{(n\theta)} \int_{k=0}^{\infty} k C n_{(kr)} \overline{U_{s(k,n)}} dk \quad (2.66)$$

dimana $U_{s(r,\theta)}$ mewakili perpindahan pada domain ruang dan $\overline{U_{s(k,n)}}$ merupakan nilai perpindahan untuk domain nomor gelombang. Tambahan lagi, Gucunski (1991) menjelaskan hanya komponen perpindahan u dan w saja yang masih tetap dalam kasus simetri searah. Oleh karena itu, baris dan lajur kedua daripada matrik D dan C_n boleh diabaikan. Perpindahan pada permukaan media dirumuskan dalam :

$$\begin{bmatrix} u_{so(r)} \\ w_{so(r)} \end{bmatrix} = \int_{k=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \frac{\partial J_0(kr)}{\partial r} & 0 \\ 0 & -kJ_0(kr) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{o(k)} \\ w_{o(k)} \end{bmatrix} dk \quad (2.67)$$

Oleh kerana hanya paramater perpindahan vertikal saja yang digunakan dalam teknik SASW, maka persamaan di atas hanya dituliskan sebagai (Gucunski, 1991):

$$w_{so}(r) = - \int_{k=0}^{\infty} k J_0(kr) w_o(k) dk = -PoRo \int_{k=0}^{\infty} J_1(kR_o) J_0(kr) w_o(k) dk \quad (2.68)$$

dan bentuk diskritnya dituliskan dalam :

$$w_{so}(r) = - \frac{i\pi qR}{2} \sum_{l=1}^{2N} \frac{(\phi_z^{ll})^2 J_1(k_l R_1) H_0^{(2)}(k_l r)}{k_l} \quad (2.69)$$

3

TRANSFORMASI FOURIER DAN ANALISIS SPEKTRUM

3.1 PENGANTAR

Analisis yang digunakan dalam teknik SASW tidak terlepas dari proses digitalisasi sinyal gelombang seismik permukaan yang direkam dalam instrumen pengukur sensor (geophone/akselerometer), konversi analog-digital. Data digital sinyal dalam domain waktu selanjutnya akan ditransformasikan dalam domain frekuensi. Transformasi ini memerlukan teknik analisis, diantaranya transformasi Laplace, Fourier, wavelets, dan teknik transformasi lainnya. Meskipun teknik transformasi telah berkembang pesat, analisis Fourier masih digunakan secara luas dalam analisis data seismik dalam teknik SASW.

Bab ini akan memuat, teori deret Fourier, persamaan dasar transformasi Fourier dan transformasi digital Fourier (DFT) yang menjadi dasar dalam transformasi data digital sinyal gelombang seismik menjadi domain frekuensi. Proses FFT merupakan analisis sinyal berdomain waktu dalam bentuk diskrit (*discrete time signals*, DTS) kepada satu seri fungsi sinus dan kosinus, yang disebut sebagai sinyal berdomain frekuensi dalam bentuk diskrit (*discrete Fourier transform*, DFT). Terdapat beberapa keuntungan dalam penggunaan DFT untuk pemrosesan sinyal gelombang seismik, yaitu proses analisis yang lebih cepat, memiliki fungsi spektrum dalam melakukan interpretasi, lebih unggul dalam mengenal karakteristik sistem sinyal-seismik dan memiliki algoritma untuk menghasilkan proses komputasi yang lebih efisien.

Akhir bab ini, turut dijelaskan analisis spektrum gelombang digunakan untuk menghasilkan data untuk analisis penyebaran kecepatan gelombang seismik. Beberapa analisis spektrum gelombang berbasis DFT yang penting yang digunakan dalam metode SASW adalah spektrum-auto *power* (*auto power*), fungsi perpindahan (*transfer function*) berbasis fase dan fungsi koheren (*coherence*). Keterkaitan antara konsep

perambatan gelombang permukaan dengan konsep analisis data dalam teknik SASW juga diberikan dalam bab ini untuk memperjelas konsep teknik analisis gelombang permukaan ini digunakan dan dikembangkan untuk investigasi perkerasan jalan.

3.2 TRANSFORMASI FOURIER

Joseph Fourier (1822), seorang ahli matematika dari Perancis menuangkan gagasan bahwa setiap fungsi periodik (sinyal) dapat dibentuk dari penjumlahan elemen-elemen dari fungsi sinus dan fungsi kosinus. Gagasan tersebut menjadi dasar dari sebuah operasi transformasi yang selanjutnya dikenal sebagai transformasi Fourier. Teknik analisis dengan transformasi digunakan dalam berbagai bidang, diantaranya untuk menyederhanakan penyelesaian suatu masalah (Brigham,1974); atau untuk mengetahui informasi tertentu yang tidak tersedia sebelumnya, misalnya memunculkan informasi frekuensi dari data periodik ruang (spasial) atau waktu.

3.2.1 Dasar Analisis Fourier

Analisis Fourier merupakan salah satu teknik analisis yang efisien untuk mengeksplorasi karakter sinyal dengan menguraikannya dalam fungsi harmonik. Karena menggunakan pendekatan fungsi harmonik, maka sinyal periodik dapat diuraikan secara langsung dengan mudah. Meskipun demikian, sinyal tidak periodik pun dapat dianalisis menggunakan pendekatan Fourier. Dalam kasus sinyal acak (tidak periodik), pendekatan numerik dapat dilakukan dalam analisis Fourier menggunakan transformasi Fourier diskrit (*Discrete Fourier Transform/DFT*.)

Persamaan dasar transformasi Fourier dapat dijelaskan berikut ini. Misalkan, diberikan fungsi periodik dalam $f(t)$, dengan periode $T = 2\pi/\omega$, dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3.1)$$

Fungsi sinus dan kosinus pada Persamaan 3.1 merupakan fungsi harmonik dan fungsi deret yang berisi seri bilangan tak terbatas dari fungsi harmonik dengan frekuensi diskrit $\omega_n = n\omega$, $n = 1, 2, \dots$

Nilai frekuensi $\omega_1 = \omega$ selanjutnya dikenal sebagai frekuensi dasar (*fundamental frequency*) dan ω_n , $n > 1$, adalah harmonik.

Koefisien Fourier, a_n dan b_n menentukan jumlah $\cos(n\omega t)$ dan $\sin(n\omega t)$ dalam fungsi $f(t)$. Hasil dari analisis Fourier terhadap sinyal adalah serangkaian besaran bilangan dari koefisien-koefisien untuk sejumlah n-bilangan.

Koefisien Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk ortogonal sinus dan kosinus sebagai berikut:

$$\frac{2}{T} \int_0^T dt \sin(n\omega t) \sin(k\omega t) = \delta_{nk} = \begin{cases} 0 & n \neq k \\ 1 & n = k \end{cases} \quad (3.2a)$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T dt \cos(n\omega t) \sin(k\omega t) = 0 \quad (3.2b)$$

$$\frac{2}{T} \int_0^T dt \cos(n\omega t) \cos(k\omega t) = \delta_{nk} \quad (3.2c)$$

Jika masing-masing fungsi $f(t)$, $\cos(n\omega t) f(t)$, dan $\sin(n\omega t) f(t)$ diintegrasikan terhadap T , maka dapat ditentukan:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.3a)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt \quad k=1,2,\dots \quad (3.3b)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt \quad k=1,2,\dots \quad (3.3c)$$

(Penjelasan detail dapat dirujuk dalam Kreyzig *Advanced Engineering Mathematics*, Wiley, 7th edn. 1993, Bab 10)

Spektrum frekuensi dari suatu sinyal merupakan penggambaran (*plot*) dari koefisien Fourier a_k dan b_k terhadap nilai k dan spektrum power (***power spectrum***) dapat dinyatakan dalam $\sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ terhadap k .

Persamaan 3.1 dapat dinyatakan juga dalam fungsi trigonometeri menjadi:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (3.4)$$

dengan $A_n = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ dan $\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$.

Persamaan 3.4 dapat dituliskan juga dalam fungsi kompleks menggunakan identitas Euler sebagai berikut:

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} C_n \exp(jn\omega t) \quad (3.5)$$

dengan $C_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n)$ (3.6)

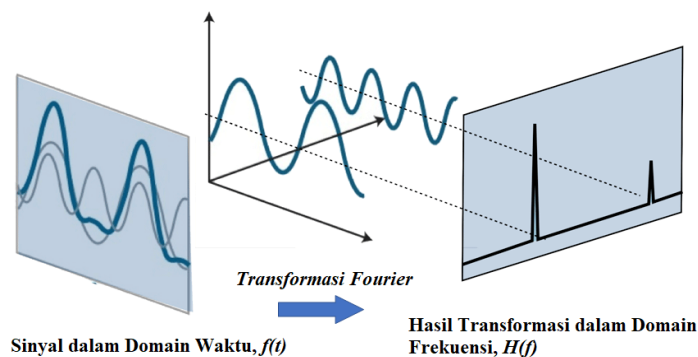
dan j merupakan $\sqrt{-1}$.

Dengan melakukan substitusi persamaan 3.3b dan 3.3c ke dalam persamaan 3.6, diperoleh:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \exp(-jn\omega t) dt \quad (3.7)$$

3.2.2 Transformasi Fourier

Transformasi Fourier dioperasikan dengan mendekomposisikan sinyal seismik sebagai fungsi sembarang/bebas (*arbitrary function*) dalam domain waktu kepada kelompok fungsi harmonik. Setiap bentuk gelombang harmonik didefinisikan dalam nilai frekuensi amplitudo dan fase gelombangnya. Jika transformasi Fourier dijalankan dengan baik, maka tidak ada informasi yang akan hilang, dan transformasi Fourier dimungkinkan dapat melakukan ekstraksi informasi dari data-data sinyal berdomain waktu. Sebagai contohnya, dalam sinyal waktu, meskipun secara periodik sinyal seismik dapat diidentifikasi namun sukar untuk menentukan nilai amplitudo dan frekuensinya (Gambar 3.1). Melalui transformasi Fourier nilai amplitudo dan frekuensi gelombangnya dapat diidentifikasi dengan jelas.



Gambar 3.1: Transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi

Transformasi integral Fourier pada sinyal seismik dapat didefinisikan (dari Persamaan 3.7):

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3.7)$$

Dengan $H(f)$ merupakan domain frekuensi representasi dari fungsi $f(t)$. demikian juga inversi transformasi dapat dijalankan dengan persamaan:

$$h(f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t) \exp(j2\pi ft) dt \quad (3.8)$$

3.2.3 Transformasi Fourier Diskrit (DFT)

Untuk menjalankan operasi transformasi Fourier, persamaan 3.7 dan 3.9, perlu dituliskan secara numerik. Beberapa catatan dalam transformasi Fourier dalam bentuk diskrit dijelaskan berikut ini.

1. Meskipun hasil transformasi diharapkan merupakan fungsi menerus (*continuous function*), data diskrit dapat diperoleh dari persamaan berikut ini:

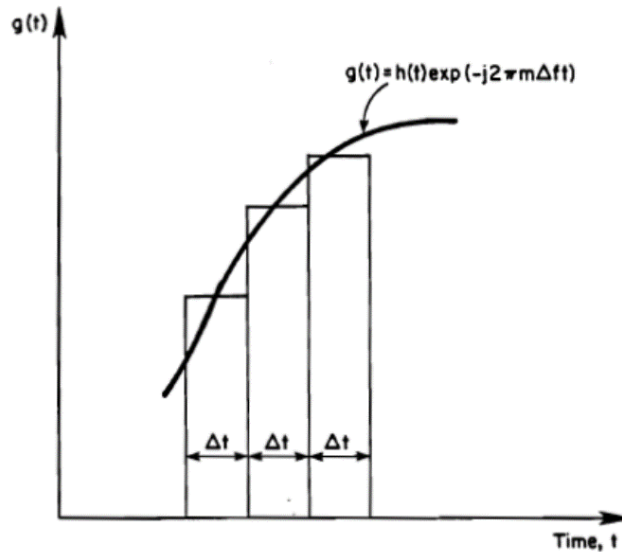
$$H_d(m \cdot \Delta f) = \Delta t \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j2\pi m \cdot \Delta f \cdot \Delta t) dt \quad (3.9)$$

Dengan m adalah angka integer yang mewakili setiap titik data diskrit dan Δf adalah peningkatan frekuensi antara dua titik data diskrit. Fungsi $H_d(m \cdot \Delta f)$ mewakili bentuk digital dari fungsi menerus $H(f)$.

2. Penggunaan integral dalam fungsi diskrit harus mengikuti kaedah integrasi numerik untuk menghitung luasan di bawah kurva sebagaimana skemanya dinyatakan dalam Gambar 3.2. Persamaan 3.9 seterusnya dituliskan dalam bentuk:

$$H_d(m \cdot \Delta f) = \Delta t \int_{n=-\infty}^{\infty} [h_d(n \cdot \Delta t) \exp(-j2\pi mn \cdot \Delta f \cdot \Delta t)] \quad (3.10)$$

dengan Δt adalah interval waktu antara dua titik data.



Gambar 3.2: Skema integral numerik dalam pemrosesan DFT

3. Dalam kasus operasi matematik diskrit, transformasi perlu dibatasi dalam suatu interval waktu yang terhingga (finite time interval), sehingga tidak dimungkinkan adanya perhitungan sampel pada periode waktu yang tidak terbatas (infinite). Dengan demikian, persamaan akhir dalam perhitungan DFT adalah:

$$H_d(m \cdot \Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} [h_d(n \cdot \Delta t) \exp(-j2\pi mn \cdot \Delta f \cdot \Delta t)] \quad (3.11)$$

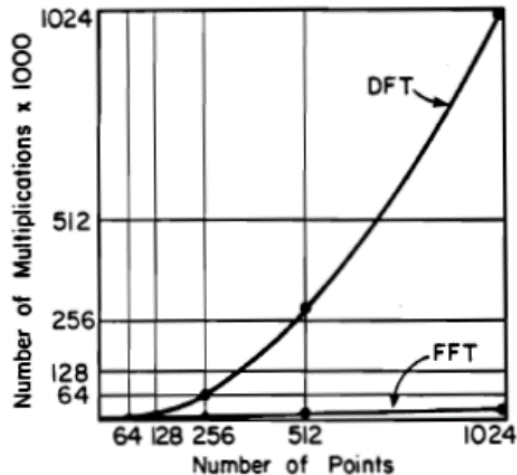
Jika $\Delta f \cdot \Delta t \cdot N = 1$, dengan N adalah jumlah titik data digital, maka:

$$H_d(m \cdot \Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} [h_d(n \cdot \Delta t) \exp(-j2\pi mn / N)] \quad (3.12)$$

3.2.4 Transformasi Fourier Cepat (FFT)

Transformasi Fourier Cepat (FFT) merupakan algoritma untuk menjalankan operasi DFT secara lebih efisien. Dengan mengasumsikan bahwa jumlah titik data merupakan perkalian dua, selanjutnya waktu pemrosesan komputasi dapat direduksi secara signifikan. Untuk menghitung deret Fourier ini secara langsung memerlukan operasi aritmetika sebanyak $O(N^2)$. Sebuah algoritma FFT hanya memerlukan operasi sebanyak $O(N \log N)$ untuk deret yang sama. Secara umum algoritma tersebut

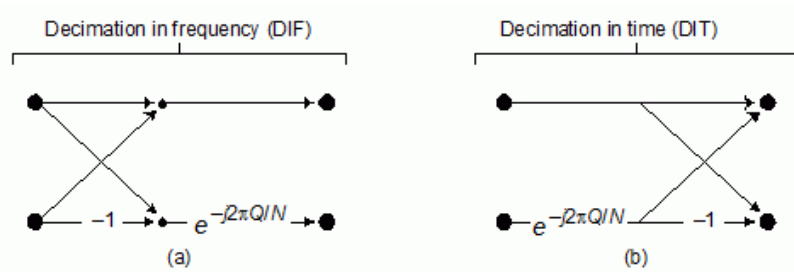
tergantung pada pemfaktoran N. Gambar 3.3 menjelaskan jumlah operasi antara DFT dan FFT.



Gambar 3.3: Perbandingan jumlah operasi dalam komputasi transformasi FFT dan DFT (Brigham, 1974)

Dalam Gambar 3.3 ditunjukkan bahwa jumlah operasi komputasi dalam proses transformasi antara FFT dan DFT. Untuk jumlah data N misalnya 1024, FFT dapat mereduksi proses operasi perkalian hingga lebih dari 200 kalinya.

Algoritma FFT yang paling awal dan karena itu paling populer adalah algoritma Cooley-Tukey (1965). Algoritma Transformasi Fast Fourier (FFT) menjalankan perhitungan fungsi Transformasi Fourier Waktu Diskrit (DFT) dengan tingkat kompleksitas yang cukup rendah dan waktu komputasi yang cepat. Salah satu metode yang sederhana dalam penerapan perhitungan algoritma FFT adalah dengan menggunakan metoda Radix-2. Dalam Radix-2, algoritma FFT dilakukan dengan perhitungan sederhana yang meliputi proses perkalian dan penjumlahan. Perkalian dan perhitungan dapat dibuat dalam urutan yang berbeda, yakni dalam *Decimation In Time* (DIT) dan *Decimation In Frequency* (DIF). Dalam DIT, proses perkalian dilakukan terlebih dahulu sebelum penjumlahan sedangkan pada DIF, proses penjumlahan dilakukan terlebih dahulu sebelum perkalian. Perhitungan tersebut dikenal sebagai perhitungan silang yang disebut sebagai *Butterfly* seperti yang disajikan pada Gambar 3.4 di bawah ini.



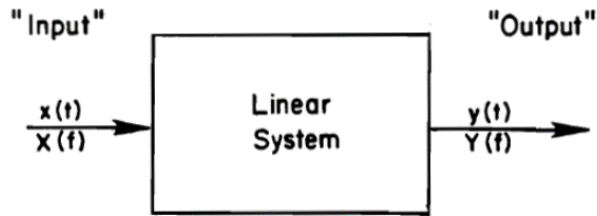
Gambar 3.4: Skema Radix 2 Butterfly pada (a) DIF, dan (b) DIT

3.3 ANALISIS SPEKTRUM

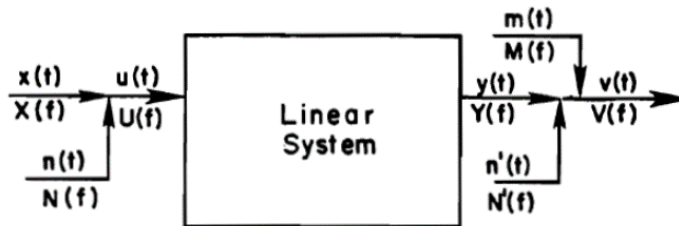
3.3.1 Konsep Spektrum Linier

Beberapa jenis pengukuran spektrum dapat dilakukan dalam domain frekuensi apabila sinyal telah ditransformasikan menggunakan Fourier. Analisis spektrum pada prinsipnya adalah operasi statistik dari satu atau gabungan dari dua bahkan lebih sinyal seismik gelombang dalam domain frekuensi.

Dalam teknik SASW yang menggunakan dua sensor (dua saluran perekaman data seismik), digunakan asumsi bahwa saluran pertama (*first channel*) diberikan nama INPUT dan saluran kedua (*second channel*) disebut sebagai OUTPUT. Analisis spektrum dalam teknik SASW merupakan sistem linier yang menunjukkan korelasi antara input dan output, ataupun hubungan keduanya terhadap input atau putput itu sendiri. Gambar 3.5 menunjukkan bagaiman akaitan antara sistem linier yang dibangun dalam analisis spektrum terhadap saluran data yang digunakan dalam teknik SASW. Dalam sistem yang ideal (Gambar 3.5a), diasumsikan bahwa output, $y(t)$, merupakan hasil dari input, $x(t)$, yang melalui sistem linier. Namun dalam kenyataannya, input akan dipengaruhi oleh adanya gangguan sinyal, ditunjukkan dalam simbol $n(t)$. Demikian juga untuk outputnya, sebagai respon dari hasil sistem linier juga akan dipengaruhi oleh gangguan sinyal setelah keluar dari sistem $[m(t)]$.



a. Idealized System



b. Actual System

Note:

$x(t)$ = Input due to Experiment,
 $y(t)$ = Output due to Experiment,
 $n(t)$ = Noise Source at Input,
 $n'(t)$ = Output due to Noise at Input,
 $m(t)$ = Noise Source at Output,
 $u(t) = x(t) + n(t)$ = Actual Input,
 $v(t) = y(t) + n'(t) + m(t)$ = Actual Output.

Capital letters denote the Fourier Transform of the functions described.

Gambar 3.5: Ilustrasi sistem linier ideal dan aktual untuk analisis spektrum dalam teknik SASW (Nazarian & Stokoe, 1986)

Salah satu keunggulan dari analisis spektrum adalah menyajikan hubungan antara dua sinyal yang diidentifikasi termasuk didalamnya data amplitudo dan fase pada setiap komponen frekuensi di setiap bentuk gelombangnya. Sebagai tambahan, dalam sistem linier berdomain frekuensi ini, faktor triggering (pemicu) gelombang, tidak perlu disinkronisasi pada setiap pengambilan data, karena input dalam sistem linier ini merupakan gelombang yang masuk dari saluran pertama. Untuk itu, disebabkan oleh sistem linier yang cenderung bebas (*independent*) terhadap faktor pemicu gelombang dan setiap amplitudo dan fase bentuk gelombang dalam analisis spektrum dapat diidentifikasi dengan jelas, maka untuk mengatasi gangguan sinyal dalam sistem linier ini, dapat dijalankan operasi pengulangan dalam analisis spektrum dapat dilakukan

selama pengukuran seismik SASW di lapangan. Jika sinyal gangguan bersifat random (acak) dan sinyal seismik yang dikehendaki dapat dibangkitkan berulang kali, maka secara teori dapat diterima bahwa nilai rata-rata sinyal dari beberapa kali pengulangan pengukuran SASW di lapangan dapat mereduksi gangguan sinyal secara signifikan. Dengan kata lain, bahwa perata-rataan sinyal dari proses pengambilan data berulang dapat mendekati kondisi actual menjadi sistem linier ideal sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3.5a.

Beberapa analisis spektrum gelombang berbasis FFT yang penting yang digunakan dalam metode SASW adalah spektrum-auto density (*autospectral density*), fungsi perpindahan (*transfer function*) berbasis fase dan fungsi koheren (*coherence*).

3.3.2. Persamaan Dasar Analisis Spektrum dalam Teknik SASW

a. Spektrum Linier

Spektrum linier merupakan operasi transformasi Fourier dari suatu sinyal gelombang seismik yang secara matematika dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3.13)$$

dengan $S_x(f)$ dan $f(t)$ masing-masing adalah spektrum linier dan sinyal seismik dalam domain waktu. Spektrum linier terdiri dari komponen nyata (riil) dan imajiner atau dapat digantikan dalam bentuk magnitudo dan fase.

b. Spektrum Auto-Power

Spektrum *auto power*, $G_{xx}(f)$, didefinisikan sebagai hasil perkalian spektrum linear, $S_x(f)$ dan bilangan kompleksnya, $S_x^*(f)$, yaitu:

$$G_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad (3.14)$$

Spektrum *auto power* merupakan bentuk nyata dan fungsi positif yang dapat dinyatakan sebagai energi dari rambatan gelombang dalam fungsi frekuensi gelombang yang dihasilkan. Spektrum ini dalam aplikasinya juga digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi dominan (beberapa referensi juga menyebutkannya sebagai frekuensi natural) dari suatu sistem linier.

c. Spektrum Fungsi Perpindahan

Fungsi perpindahan, $H(f)$, merupakan perbandingan nilai output terhadap input spektrum linier gelombang, yang dinyatakan dalam bentuk:

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (3.15)$$

Fungsi perpindahan juga dikenali sebagai fungsi respon atau reaksi frekuensi. Jika kedua spektrum linier output dan input melibatkan bilangan kompleks, maka persamaan di atas merupakan fungsi dari spektrum tenaga silang (G_{yx}) dan tenaga autonya (G_{xx}), yang dapat ditulis sebagai :

$$H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} = \frac{A_2}{A_1} \{\cos(\phi_2 - \phi_1) + i \sin(\phi_2 - \phi_1)\} \quad (3.16)$$

disini $(\phi_2 - \phi_1)$ adalah perbedaan nilai fase diantara dua komponen gelombang yang ditentukan oleh sudut fase yang diperolehi dari kedua sensor gelombang. Selanjutnya data ini dapat digunakan untuk menghitung kecepatan fase dalam pembuatan kurva penyebaran lapangan dari pengukuran SASW (Joh, 1996) dan sifat pelemahan suatu sistem linear (Gucunski, 1991).

d. Spektrum Fungsi Koheren

Fungsi koheren didefinisikan sebagai perbandingan tenaga output yang disebabkan oleh input terhadap seluruh output yang diukur. Fungsi ini dinyatakan sebagai:

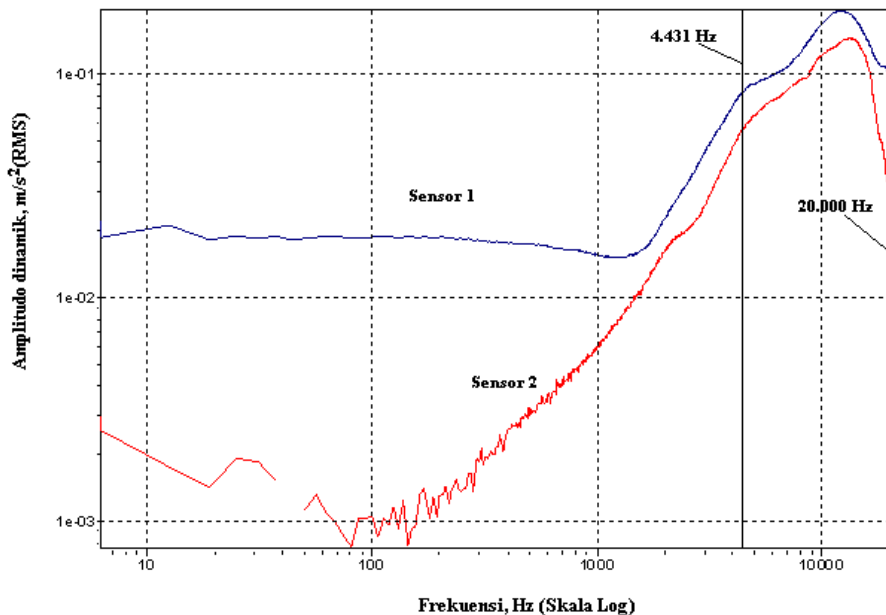
$$\gamma^2(f) = \frac{[G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)]}{[G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)]} \quad (3.17)$$

disini $\gamma^2(f)$ adalah nilai koheren yang digunakan untuk mengenal pasti korelasi terbaik diantara sinyal input dan output.

Nilai koheren ditetapkan sebagai nomor nyata diantara 0 - 1. Stokoe dkk. (1994) menjelaskan bahwa nilai koheren 1 didefinisikan sebagai nilai perbandingan tertinggi penggabungan diantara sinyal sedangkan nilai yang lebih rendah daripada 1 menunjukkan penurunan kualitas sinyal. Al Hunaidi (1992) menyatakan bahwa nilai koheren yang boleh digunakan sebagai parameter pengukuran bagi sinyal yang baik bernilai lebih dari 0.98. Meskipun demikian, nilai koheren yang rendah tidak hanya sepenuhnya disebabkan oleh kualitas korelasi yang rendah diantara sinyal. Terdapat beberapa faktor lainnya seperti resolusi lebar jalur frekuensi yang rendah dan sinyal masukan yang berganda (Nazarian, 1984) yang menyebabkan nilai koheren yang rendah.

3.3.3. Studi Kasus: Aplikasi Analisis Spektrum dalam Teknik SASW untuk Pengukuran Perkerasan Jalan

Analisis data seismik yang pertama dilakukan untuk mendapatkan respon energi dalam domain frekuensi melalui plot spektrum auto power. Pengukuran SASW dilaksanakan di atas perkerasan jalan Jalan Wonosari/Piyungan-Gading Yogyakarta dengan jarak antar sensor 4, 8, 16, 32, 64, 100 dan 200 cm. Gambar 3.6 menunjukkan spektrum auto power hasil analisis FFT berdasarkan sistem linier dari rekaman data dua sensor. 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, diperoleh wilayah frekuensi respon antara 4,43 – 20 kHz. Wilayah frekuensi pada spektrum ini merupakan frekuensi dominan atau natural dari bahan yang dirambati gelombang seismik. 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 16 dan 32 cm, dan jarak sensor 64, 100 dan 200 cm dapat juga digunakan untuk mendapatkan karakter dari parameter seismik bagi lapisan fondasi dan tanah dasar jalan.

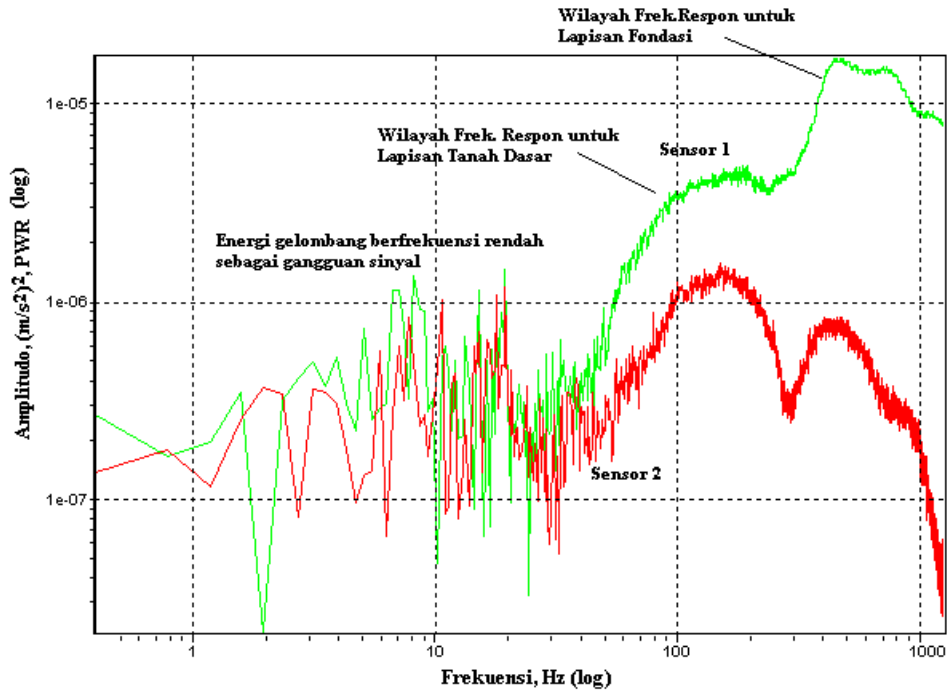


Gambar 3.6: Spektrum-auto density untuk jarak sensor 4 cm

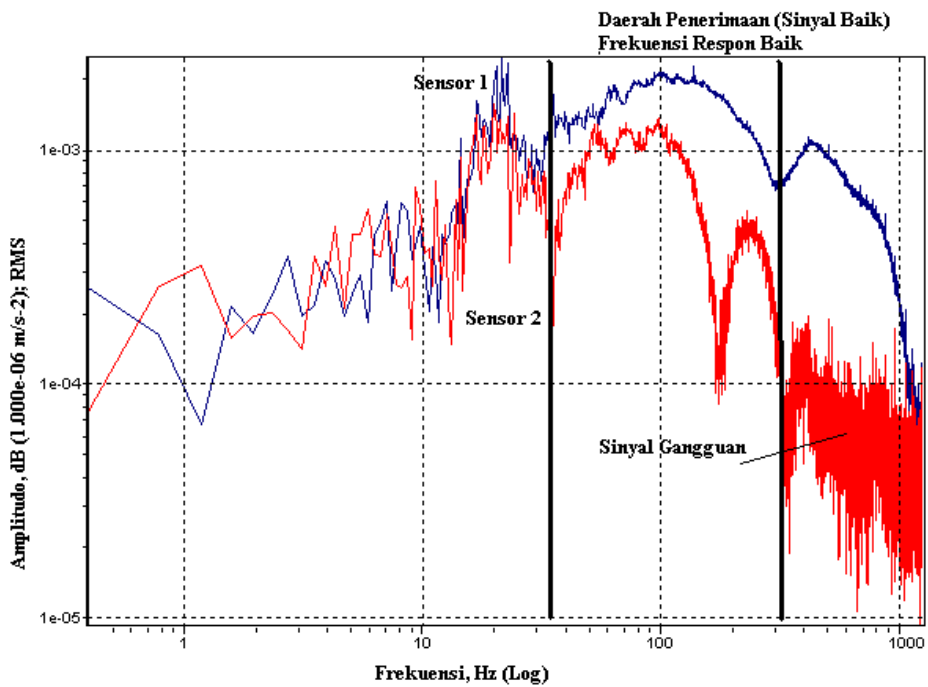
Pada konfigurasi pengukuran jarak sensor 64 cm ditafsirkan mampu mendeteksi perambatan gelombang seismik pada peralihan lapisan fondasi dan tanah dasar. Melalui spektrum auto yang ditampilkan (Gambar 3.7), kedua wilayah respon frekuensi bagi kedua lapisan penyusun perkerasan tersebut dapat dikenali dengan baik. Lapisan fondasi jalan dideteksi memiliki respon frekuensi di atas 400 Hz yang dilihat dari puncak kedua spektrum auto power, sedangkan lapisan tanah dasar diidentifikasi pada wilayah frekuensi antara 40 hingga 300 Hz. Untuk mendapatkan konsistensi respon frekuensi pada lapisan tanah dasar, spektrum auto untuk jarak sensor 100 atau 200 cm dapat digunakan. Spektrum auto pada jarak sensor 200 cm menampilkan analisis respon frekuensi pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan dan tanah asli pada lokasi pengujian (di Jalan Wonosari/Piyungan-Gading). Hasil spektrum auto menunjukkan wilayah frekuensi respon yang baik dari analisis gelombang yang diterima adalah 32 hingga 300 Hz (Gambar 3.8), hal ini menunjukkan konsistensi hasil dengan rekaman jarak 64 cm (Gambar 3.7).

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 tanah dasar perkerasan jalan.

Analisis spektrum auto power tersebut di atas membuktikan bahwa terdapat keuntungan penggunaan FFT untuk menganalisis respon dominan gelombang and menentukan karakteristik parameter seismik bahan perkerasan jalan yang dilalui oleh gelombang.



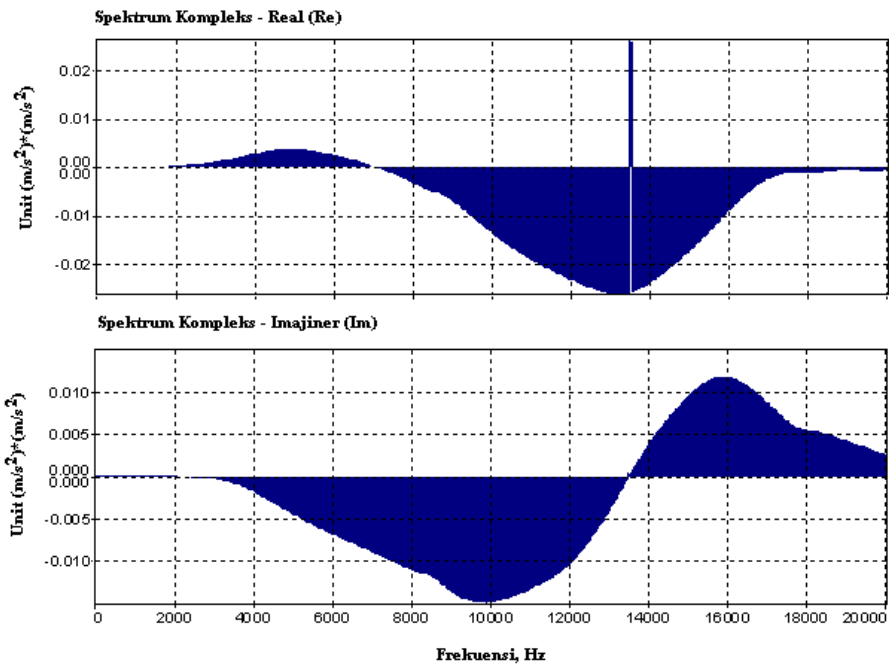
Gambar 3.7: Spektrum-auto density untuk jarak sensor 64 cm



Gambar 3.8: Spektrum-auto density untuk jarak sensor 200 cm

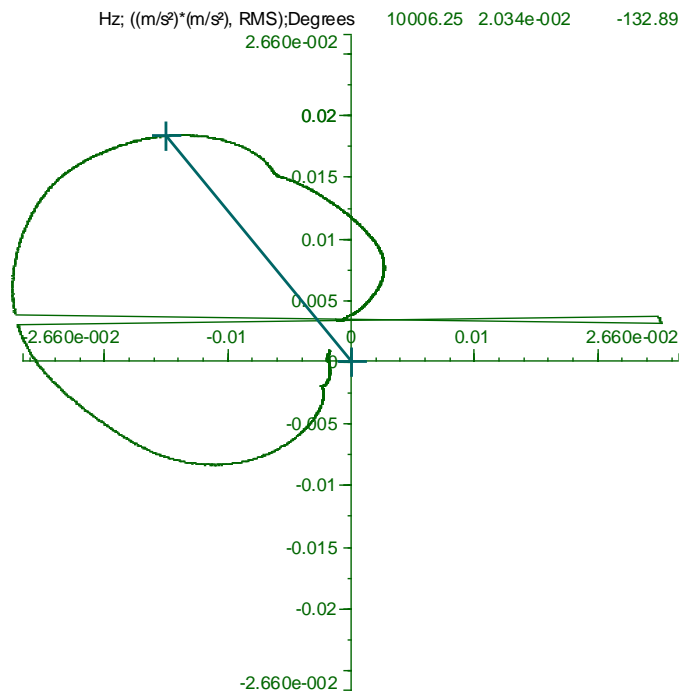
Untuk mendapatkan karakteristik seismik kekakuan bahan, data spektrum auto power perlu terlebih dahulu dianalisis ke dalam spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*) dan fungsi transfer (*transfer function spectrum*). Pengoperasian spektrum tersebut adalah untuk mengidentifikasi kesamaan dan keterkaitan (*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 3.9 menunjukkan contoh tipikal spektrum kompleks dari tampilan spektrum tenaga silang dari pengukuran data seismik pada jarak antar sensor 4 cm. Dari Gambar 3.9 tersebut dapat juga dianalisis dalam bentuk spektrum Nichols/Nyquist untuk melihat plot corak kekompleksan sinyal yang diterima sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 3.10. Dari spektrum tersebut diperoleh bahwa corak gelombang yang diterima oleh sensor pertama dan kedua dari jarak pengukuran 4 cm adalah sama dan saling terkait. Corak sederhana dan jelas ditunjukkan dalam spektrum Nichols/Nyquist (Gambar 3.10). Hal ini juga mengindikasikan bahwa sinyal gangguan dari sumber lain (misalnya lalu lintas, sumber getaran di sekitar lokasi, gerakan bumi, pengaruh interfensi gelombang listrik, dll.) berfrekuensi tinggi tidak ditemui dalam pengukuran jarak sensor 4 cm.



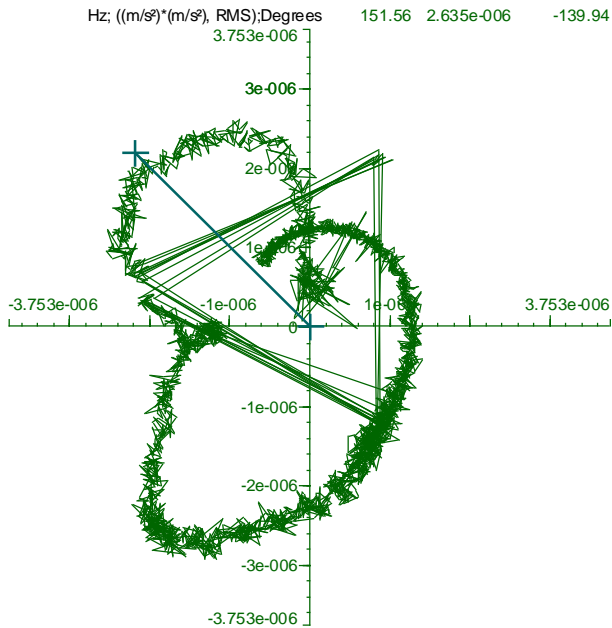
Gambar 3.9: Spektrum-tenaga silang dalam bentuk kompleks untuk jarak antar sensor 4 cm

Kondisi ini berbeda dengan spektrum Nichols/Nyquist pada jarak sensor 64 dan 200 cm. Gambar 3.11 dan Gambar 3.12 menunjukkan tampilan Re dan Im dalam spektrum Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 64 dan 200 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.

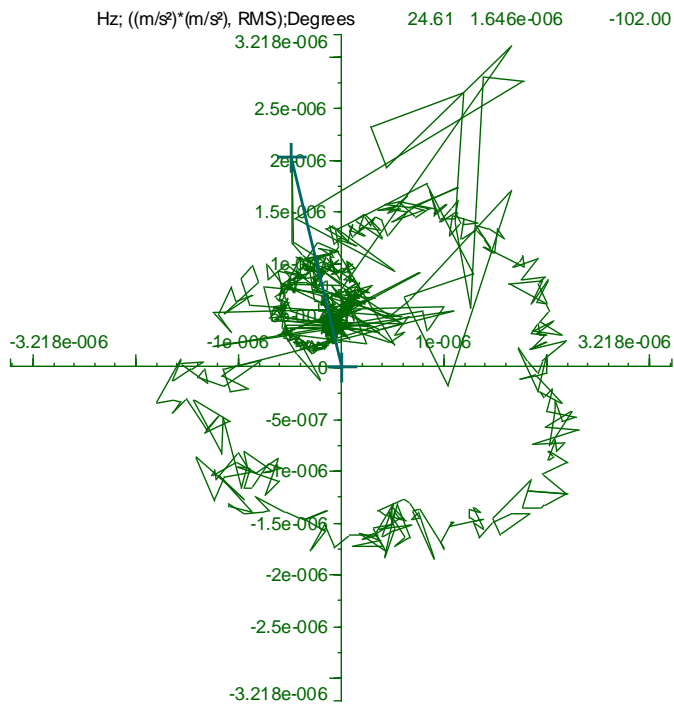


Gambar 3.10: Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak antar sensor 4 cm

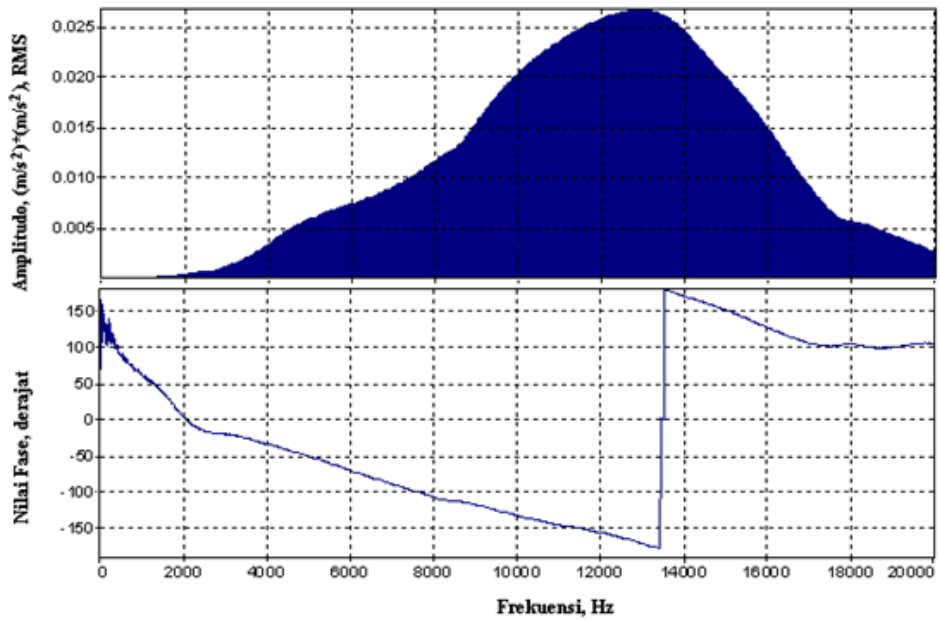
Gambar 3.13 menunjukkan hasil akhir spektrum tenaga silang dan fungsi transfer dari data seismik pengukuran 4 cm. Sebagaimana telah dijelaskan di atas bahwa kejelasan corak gelombang dalam data pengukuran 4 cm (dilihat dari bentuk spektrum Nichols/Nyquist) akan menghasilkan spektrum tenaga silang yang 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.



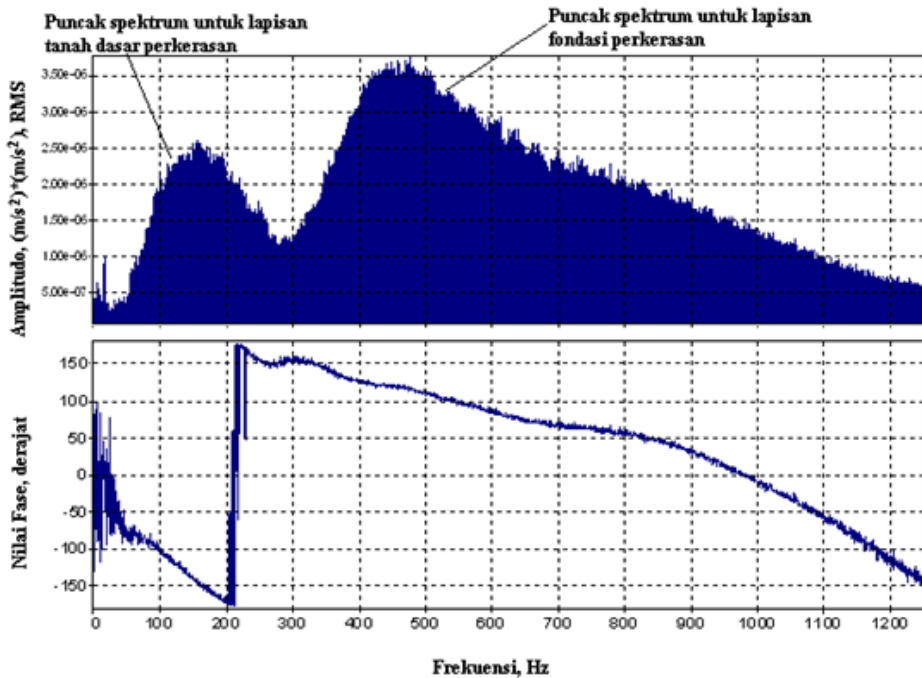
Gambar 3.11: Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak antar sensor 64 cm



Gambar 3.12: Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak antar sensor 200 cm

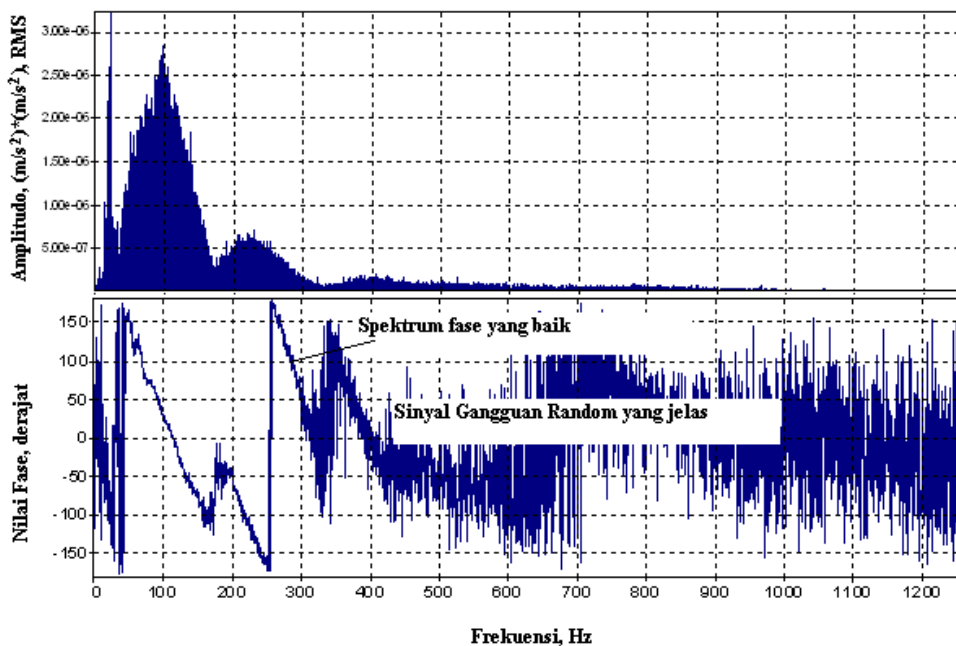


Gambar 3.13: Spektrum fase dari pengukuran jarak antar sensor 4 cm



Gambar 3.14: Spektrum fase dari pengukuran 64 cm

Spektrum gelombang untuk pengukuran 64 cm diberikan dalam Gambar 3.14. 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 3.15 menjelaskan spektrum fungsi transfer untuk pengukuran 200 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.

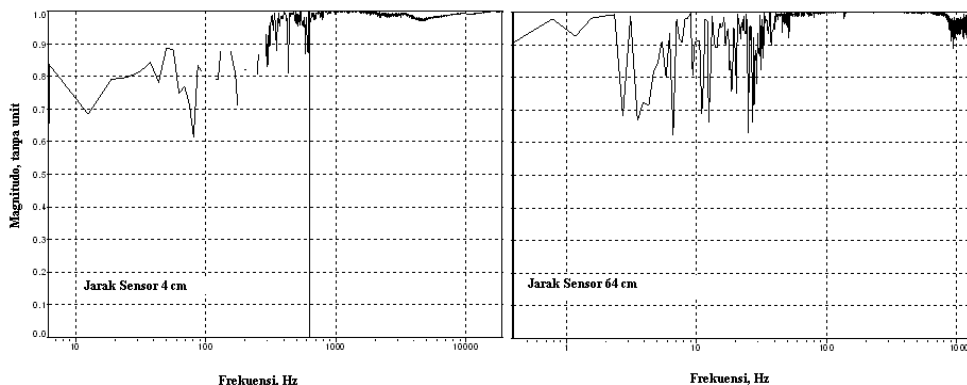


Gambar 3.15: Spektrum fase dari pengukuran jarak antar sensor 200 cm

Dari plot spektrum fase terlihat bahwa spektrum dari kedua jarak sensor memiliki wilayah frekuensi yang berbeda. Untuk jarak pengukuran 4 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 64 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 200 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.

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 3.16 memperlihatkan hasil spektrum fungsi koheren dari kedua spektrum fase untuk jarak sensor 4 cm dan 64 cm. Pada spektrum koheren jarak sensor 4 cm, nilai wilayah frekuensi yang baik untuk sinyal yang merambat di kedua sensor adalah 656 Hz - 18,9k Hz dengan nilai koheren minimum 0,983 dan untuk spektrum koheren pengukuran 64 cm diperoleh wilayah frekuensi 85 - 853 Hz dengan nilai 0,984. Kelayakan batas nilai koheren ini minimum sebesar 0,98 sebagaimana merujuk pada Al Hunaidi (1992).



Gambar 3.16: Spektrum koheren hasil analisis untuk jarak sensor 4 dan 64 cm

4

PRINSIP TEKNIK SASW DAN PERALATAN PENGUKURAN

4.1 PENGANTAR

Teknik SASW merupakan salah satu teknik seismik yang memanfaatkan perambatan gelombang permukaan untuk mengevaluasi perkerasan jalan untuk mendapatkan nilai struktural lapisannya berupa kekakuan (modulus elastisitas) bahan. Metode pengukuran SASW dapat dibagi dalam tiga tahapan, yaitu:

1. Tahapan pengukuran gelombang seismik di lapangan,
2. Tahapan pemrosesan sinyal dan analisis spektrum hingga mendapatkan kurva dispersi empirik,
3. Tahapan inversi kurva dispersi empirik untuk mendapatkan profil kekakuan (modulus elastisitas) jalan,

Dalam bab ini, diuraikan prinsip-prinsip kerja dari teknik SASW dan peralatan-peralatan yang diperlukan untuk pengukuran lapangan.

4.2 PRINSIP KERJA DALAM TEKNIK SASW

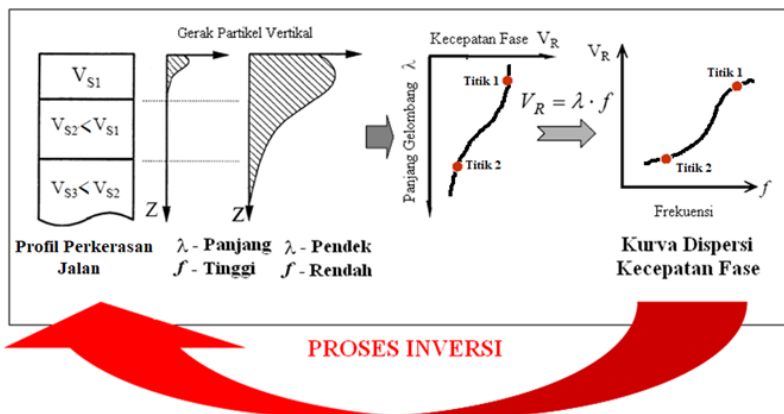
Prinsip kerja utama dalam teknik SASW adalah menentukan karakteristik dispersi kecepatan gelombang fase/gelombang *Rayleigh* (gelombang *R*) yang merambat pada media berlapis perkerasan jalan. Fenomena ini yang disebut sebagai dispersi ini dipengaruhi oleh frekuensi dan panjang gelombang dimana bahasan ini telah banyak dianalisis pada akhir tahun 1940an sebagaimana dijelaskan secara lebih terperinci oleh Ewing et al. (1957) dan Kramer (1994). Berdasarkan sifat dispersi inilah gelombang *R* digunakan sebagai media untuk mengevaluasi setiap lapisan perkerasan jalan dari lapisan permukaan hingga ke tanah dasar.

4.2.1 Pengaruh Frekuensi dan Panjang Gelombang terhadap Kecepatan Fase Gelombang Permukaan

Selain sifat dispersi gelombang permukaan, pertimbangan lain penggunaan gelombang *R* dalam pengujian material adalah kemudahan gelombangnya untuk dihasilkan atau

dibangkitkan dari sumber mekanik, serta kemudahannya untuk dideteksi melalui permukaan lapisan perkerasan. Salah satu parameter yang berpengaruh adalah nilai frekuensinya. Nilai frekuensi yang digunakan dalam teknik SASW untuk evaluasi perkerasan jalan memiliki spektrum yang luas. Mulai dari frekuensi rendah, sekitar 10 hingga 100 Hz guna mendeteksi rambatan gelombang R pada lapisan tanah dasar, hingga menggunakan frekuensi gelombang mencapai 10 hingga 35 kHz untuk lapisan permukaan jalan. Bahkan, gelombang R pada frekuensi ultrasonik telah digunakan untuk mendeteksi lokasi retak dan bentuk kerusakan lain (*imperfections*) pada struktur perkerasan lentur jalan dan lapisan PCC pada perkerasan jalan.

Dalam pembahasan ini, dikaitkan konsep antara frekuensi gelombang terhadap sifat dispersi kecepatan fase dengan konfigurasi pengukuran dalam metode SASW. Bagi menjelaskan konsep ini, dimulai dengan menggambarkan profil berlapis perkerasan jalan seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.1. Profil berlapis tersebut dikarakteristikan secara irreguler dengan dimulainya nilai kekakuan yang tinggi pada lapisan permukaan selanjutnya akan menurun searah dengan kedalamannya, yang ditunjukkan dengan variasi nilai kecepatan gelombang geser dari tinggi ke rendah. Profil perkerasan jalan dikelompokkan sebagai profil kompleks karena perubahan lapisannya cukup ekstrem dari lapisan permukaan yang kaku menuju lapisan dibawahnya (fondasi dan tanah dasar) yang kurang kaku.



Gambar 4.1: Identifikasi parameter pada dispersi geometrik gelombang permukaan. Konsep dispersi kecepatan fase menjelaskan fenomena fisika yang merambat pada media berlapis (Gambar 4.1) bahwa pergerakan gelombang R berfrekuensi tinggi (dengan panjang gelombang pendek) akan merambat pada lapisan bagian atas (permukaan perkerasan) dan kecepatan fase yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan gelombang geser pada lapisan lainnya di bawah permukaan.

Di sisi lain, gelombang R berfrekuensi rendah (dengan gelombang yang lebih panjang) akan merambat pada kecepatan fase yang lebih rendah dan berpenetrasi lebih dalam karena dipengaruhi oleh lapisan yang kurang kaku di bawah lapisan permukaan.

Fenomena ini dapat terus diamati pada beberapa rentang frekuensi lain yang lebih rendah. Hubungan antara kecepatan fase dan frekuensi (dan/atau panjang gelombang) ini selanjutnya digambarkan dalam sebuah kurva yang disebut sebagai kurva dispersi kecepatan fase (*phase velocity dispersion curve*). Gambar 4.1 juga menunjukkan kurva dispersi kecepatan fase untuk media berlapis irregular dimana nilai kecepatan fasenya semakin kecil searah dengan panjang gelombangnya. Informasi dispersi gelombang permukaan juga dapat direpresentasikan dalam hubungan antara kecepatan fase dan frekuensinya. Pengaruh frekuensi dan panjang gelombang dalam penerapan teknik SASW untuk evaluasi perkerasan jalan akan berpengaruh pada konfigurasi pengukuran lapangan dan pemilihan sumber gelombangnya.

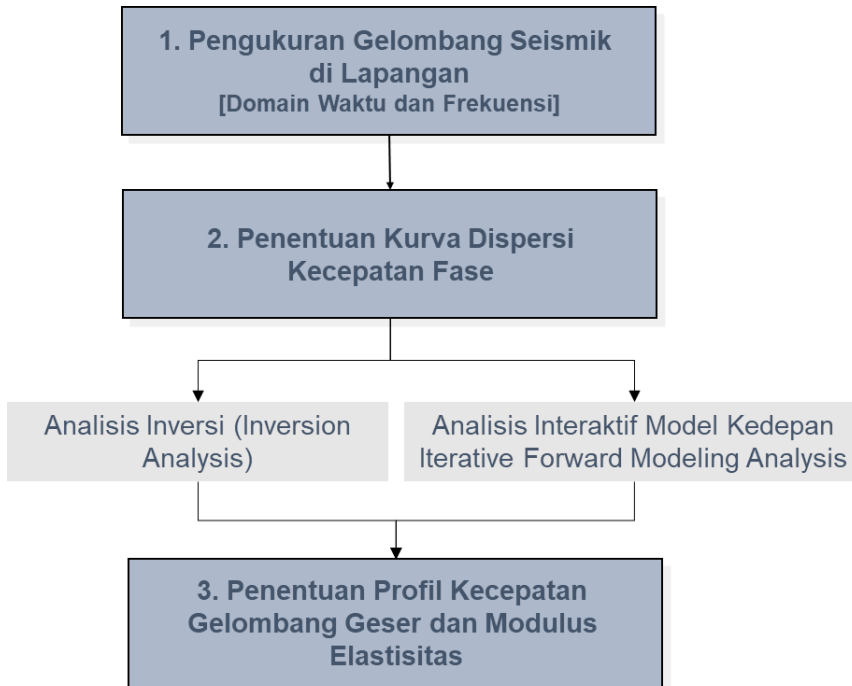
4.2.2 Pengaruh Mode Lebih Tinggi pada Profil Irregular

Pada media berlapis yang irregular, kurva dispersi kecepatan fase akan dipengaruhi oleh variasi parameter (sifat) media terhadap kedalamannya dan pengaruh mode fundamen serta mode tinggi. Pengaruh ini selanjutnya disebut sebagai masalah susulan (*forward problem*). Jika kurva dispersi ditentukan dari data eksperimental melalui pengukuran data rambatan gelombang di lapangan, maka adalah dimungkinkan untuk menyelesaikan masalah inversi (*inversion problem*) yaitu dengan menyusun parameter model profil perkerasan. Menggunakan teori dan model perambatan gelombang permukaan yang memperhitungkan pengaruh mode fundamen dan mode tinggi perambatan gelombang seismik, kurva dispersi kecepatan fase teori (*theoretical dispersion curve*) dapat dihasilkan. Selanjutnya, proses penyesuaian (iterasi) parameter model dilakukan hingga distribusi data kurva teori tepat sama atau mendekati kepada kurva eksperimennya. Pengaruh mode fundamen dan mode tinggi tersebut di atas merupakan konsep dasar dalam analisis inversi dalam teknik SASW. Asas persamaan mode fundamen dan mode tinggi telah dijelaskan dalam persamaan dasar perambatan gelombang seismik (Bab 2).

Gambar 4.2 menunjukkan bagan alir prosedur standar metode SASW yang dapat dibagi dalam tiga tahapan utama, yaitu:

1. pengukuran di lapangan untuk mendapatkan data perambatan gelombang,
2. analisis dan pembangunan kurva dispersi kecepatan fase eksperimen,
3. penyusunan profil kecepatan gelombang geser melalui proses inversi dan pemodelan ke depan.

Perlu dicatat di sini, bahwa tahapan-tahapan di atas merupakan tahapan yang saling berhubungan satu dengan lainnya dan berkaitan dimana hasil dari satu tahapan akan mempengaruhi tahapan berikutnya dan pada akhirnya menentukan hasil akhir dan keberhasilan proses pengukuran SASW secara keseluruhan.



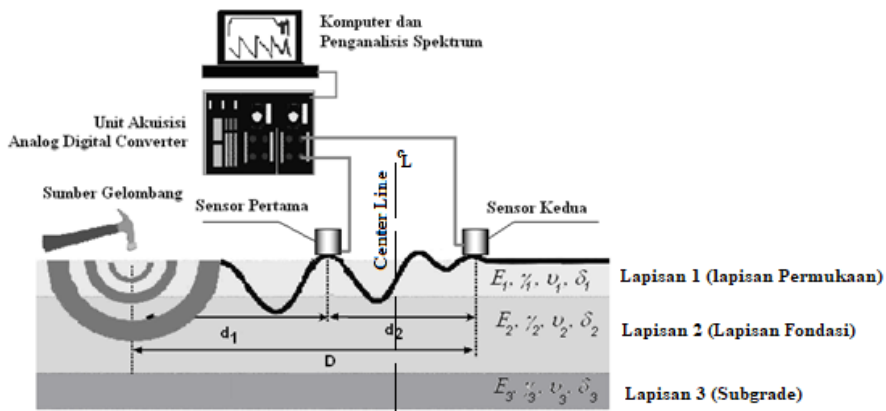
Gambar 4.2: Bagan alir tahapan dalam pengukuran dan analisis gelombang permukaan

4.3 PERALATAN UNTUK PENGUJIAN LAPANGAN

Tujuan utama pengujian di lapangan dalam metode SASW adalah untuk mendapatkan data berupa sinyal gelombang yang merepresentasikan perambatan energi gelombang permukaan melalui dua (atau lebih) sensor. Konfigurasi secara umum untuk pengukuran di lapangan menggunakan dua sensor ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Pengujian lapangan metode gelombang permukaan dilakukan dengan menggunakan peralatan:

1. peralatan sumber gelombang,
2. sensor, dan
3. unit akuisi data dan sistem penganalisis spektrum.

Sensor diletakkan di atas permukaan media, yang disambung kepada unit akuisi data untuk merekam perambatan gelombang yang dihasilkan dari sumber gelombang mekanik. Data yang masuk ke dalam unit akuisi dipindahkan ke unit komputer untuk pemrosesan sinyal dan analisis spektrumnya. Penjelasan mengenai spesifikasi peralatan yang diperlukan untuk melakukan pengujian lapangan metode gelombang permukaan diberikan berikut ini.



Gambar 4.3: Konfigurasi pengukuran dan peralatan dalam pengujian lapangan metode gelombang permukaan menggunakan dua sensor untuk struktur perkerasan jalan

4.3.1 Sumber Gelombang

Sumber mekanik pembangkit gelombang yang digunakan dalam pengujian metode gelombang permukaan di lapangan adalah sumber mekanik yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya dirambatkan dalam bentuk energi gelombang seismik. Gelombang seismik akan merambat pada rentang frekuensi yang diperlukan dalam pengukuran. Dengan demikian, pemilihan sumber gelombang ditentukan berdasarkan rentang frekuensi yang diperlukan.

Secara umum, dalam teknik SASW, terdapat tiga jenis sumber gelombang yang dapat digunakan yaitu: (i) sumber transien aktif (*active transient source*) yang serupa dengan sumber pukulan mekanik seperti bola baja, pemukul/palu ringan dan palu besar; (ii) sumber harmonik aktif (*active harmonic source*) dengan pembangkit gelombang menerus terkontrol (*controlled continuous source*) dan (iii) sumber gelombang pasif (*passive source*), misalnya mikrotremor atau getaran dari kendaraan lalu lintas.

Keunggulan penggunaan berbagai jenis sumber gelombang di atas adalah kemudahan dalam mobilitas dan pengukuran di lapangan. Sebagai tambahan, sumber ini dapat untuk menghasilkan pengukuran sinyal berdomain waktu yang dapat meningkatkan kualitas sinyal terhadap gangguan sinyal dari lingkungan sekitar (*signal to noise ratio*); dan dapat juga menghasilkan rentang frekuensi yang lebar secara bersamaan. Meskipun demikian, frekuensi yang dihasilkan oleh suatu sumber gelombang transien adalah

sangat terbatas dan rentang frekuensinya agak sukar dimonitor. Oleh karena itu, dalam penggunaan sumber aktif transien memerlukan satu set sumber mekanik yang dapat berupa beberapa jenis palu untuk menghasilkan energi gelombang dalam rentang frekuensi yang berbeda, yaitu dari frekuensi tinggi ke frekuensi rendah.

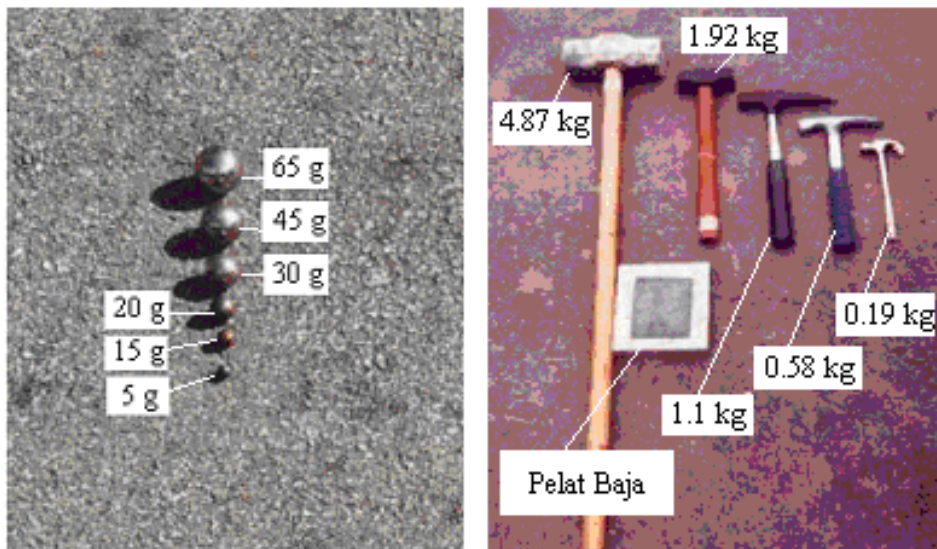
Dalam penggunaan sumber gelombang transien, studi yang dilakukan oleh Rosyidi (2004), penggunaan sumber transien yang sama belum tentu dapat menghasilkan frekuensi dominan yang sama pada lokasi yang berbeda. Hal ini dipengaruhi oleh bahan dan berat palu yang digunakan serta kekakuan profil bahan pada lokasi pengujian. Oleh sebab itu, sebelum dilakukan pengujian gelombang permukaan, *pilot study* (pengujian percobaan) perlu dilakukan dengan menggunakan berbagai jenis dan berat sumber yang berbeda. Pengujian percobaan ini dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh rentang frekuensi dan kecepatan fase yang dikehendaki dapat diperoleh dalam pengukuran.

Untuk mendapatkan sampel gelombang pada kedalaman yang dangkal, penggunaan sumber berfrekuensi tinggi dapat menghasilkan data yang baik. Bagi pedeteksian lapisan dangkal, energi yang perlu disalurkan oleh sumber gelombang adalah jumlah energi yang kecil. Ini karena untuk jarak antara sensor yang pendek pada konfigurasi dua hingga enam sensor, energi gelombang R masih dapat dideteksi dengan baik oleh kedua sensor, sedangkan untuk konfigurasi multi-sensor (misalnya lebih dari 6 sensor), diperlukan energi gelombang yang lebih besar bagi memastikan energi dapat merambat hingga sensor yang ditempatkan di posisi paling akhir.

Pengambilan data sinyal pada lapisan yang dalam sangat dipengaruhi oleh frekuensi gelombang yang rendah dan besarnya energi yang dihasilkan pada permukaan media. Dalam hal ini, hanya gelombang berfrekuensi rendah dengan amplitudo yang cukup tinggi dapat diterima oleh sensor karena gelombang yang dihasilkan merambat lebih dalam dan jauh. Untuk menghasilkan gelombang dengan frekuensi yang rendah, diperlukan sumber gelombang yang dapat menghasilkan implus dengan periode yang lebih lama. Sumber yang berat dengan ukuran yang besar seperti *drop weight* atau pemukul (palu) berat dapat menghasilkan rentang frekuensi ini.

Untuk sumber gelombang berfrekuensi yang tinggi sebagai sumber transien-aktif seperti palu dengan frekuensi tinggi terkontrol atau bola baja misalnya dengan ukuran diameter 12 hingga 50 mm dengan berat 5, 15, 20, 30, 45 dan 65 g. Jenis sumber gelombang ini biasanya digunakan untuk menghasilkan energi gelombang yang merambat pada lapisan permukaan jalan. Untuk frekuensi yang lebih rendah, dapat digunakan pemukul (palu) mulai dari berat 0,2 hingga 8 kg; dan *drop weight* dari 10 hingga 50 kg yang dalam penggunaannya memerlukan satu set katrol dan/atau kompresor untuk memudahkan pengoperasiannya. Dalam penggunaan sumber gelombang frekuensi rendah dalam pengukuran di perkerasan jalan; biasanya digunakan pelat baja atau aluminium. Selain digunakan untuk menghasilkan kontak

yang lebih lebar dengan media sehingga dapat menghasilkan getaran berfrekuensi rendah, pelat ini juga digunakan untuk menghindari tumbukan langsung yang dapat merusak permukaan media, misalnya pengujian di atas perkerasan jalan. Sumber gelombang berfrekuensi rendah digunakan untuk menghasilkan rambatan energi gelombang untuk lapisan yang lebih dalam yaitu lapisan fondasi hingga tanah dasar. Gambar 4.4 menunjukkan beberapa contoh sumber gelombang transien aktif yang dapat digunakan dalam pengujian metode pengukuran gelombang permukaan.



Gambar 4.4: Beberapa contoh sumber gelombang transien-aktif: bola baja; pemukul (palu) dan *drop weight* untuk menghasilkan energi gelombang R dengan rentang frekuensi yang berbeda

Seperti disampaikan sebelumnya, bahwa pengujian percobaan terhadap sumber gelombang transien aktif diperlukan untuk mengetahui respon frekuensi masing-masing sumber gelombang yang digunakan. Rosyidi (2004) mempelajari pola distribusi frekuensi untuk masing-masing sumber gelombang bola baja dan palu yang berbeda. Hasil studinya ditunjukkan dalam Tabel 4.1. Sumber gelombang berupa bola baja (*steel ball bearing*) dengan variasi berat 5 hingga 360 g digunakan untuk mengukur pergerakan gelombang dengan frekuensi tinggi dengan respon frekuensi dari 0,6 hingga 20 kHz, sedangkan palu yang digunakan dengan berat 0,19 hingga 4,87 dapat menghasilkan frekuensi pada wilayah antara 194 hingga 962 Hz.

Tabel 4.1: Wilayah frekuensi untuk beberapa sumber gelombang yang digunakan (Rosyidi, 2004)

Berat Bola Baja (g)	Wilayah Frekuensi (kHz)		Berat Palu (kg)	Wilayah Frekuensi (kHz)	
	Terendah	Tertinggi		Terendah	Highest
5	9.8	20	0.19	962.5	2575
15	8	18	0.58	556.25	1718.75
30	4	12	1.1	487.5	1575
45	2	8	1.92	406.25	1087.5
65	1	3	4.87	194	580
130	0.813	2.26			
225	0.775	2.17			
360	0.663	1.781			

Pengujian gelombang permukaan menggunakan sumber aktif-harmonik, seperti penggetar vertikal memerlukan waktu pengujian yang lebih lama karena pengujian dilakukan satu per satu pada setiap frekuensi tunggal dalam suatu rentang frekuensi yang diamati. Kelebihan sumber gelombang ini adalah frekuensi sumber gelombang dapat dikawal (Tokimatsu et al., 1991). Tambahan lagi, sumber harmonik dapat menghasilkan energi gelombang secara berulang (sinus harmonik) dalam frekuensi yang lebih rendah berbanding sumber transien (Spang, 1995). Meskipun demikian, sumber jenis ini mempunyai kelemahan jika digunakan untuk mendapatkan sampel respon tanah yang dalam. Ini karena diperlukannya level energi yang besar untuk mendapatkan respon frekuensi yang sangat rendah pada lapisan yang dalam (misalnya 1 hingga 2 Hz) dan energi gelombang dari sumber harmonik aktif ini tidak dapat mencapai level tersebut. Tambah lagi, penggunaan sumber harmonik aktif, biasanya terbatas pada frekuensi rendah ke menengah. Oleh itu, untuk penggunaan sumber harmonik ini pada media dengan kekakuan yang tinggi (misalnya lapisan aspal dan lapisan beton pada struktur perkerasan jalan) adalah tidak dianjurkan. Contoh sumber gelombang harmonik aktif yang digunakan dalam pengukuran gelombang permukaan dapat dilihat pada Gambar 4.5. Gambar tersebut menunjukkan sebuah penggetar elektromagnet *Ling Dynamics* model 400 yang diletakkan di atas sebuah pelat dasar berdiameter 200 mm. Peralatan ini digunakan beserta seperangkat pengatur sumber harmonik dan amplifier sehingga dapat membangkitkan frekuensi gelombang pada rentang 5 hingga 100 Hz.



Gambar 4.5: Sumber harmonik-aktif electromagnet *Ling Dynamics* model 400

Untuk mendapatkan sampel respon tanah yang dalam, Tokimatsu (1995) mengusulkan penggunaan sumber pasif berupa getaran mikro (*microtremors*) atau gelombang derau natural. Sumber pasif merupakan suatu penyelesaian alternatif terhadap kelemahan sumber aktif. Sumber pasif ini biasanya mempunyai level energi yang besar pada rentang frekuensi yang sangat rendah dimana sumber aktif baik transien maupun harmonik sukar untuk mencapai rentang frekuensi ini. Meskipun demikian, pengujian gelombang permukaan menggunakan sumber pasif adalah tidak praktis digunakan karena hanya dapat dilakukan pada lokasi pengujian dengan sumber getaran mikro yang memadai (Yoon, 2005). Disamping itu, kesuksesan pengukuran hingga mendapatkan profil tanah, diperlukan suatu geometri pengukuran yang tepat supaya gelombang yang diterima dapat dianalisis dengan baik (Zywicki, 1991). Selain itu, perpindahan partikel vertikal yang dapat dideteksi hanya bersumber dari rambatan energi gelombang *R* (Tokimatsu, 1995) sehingga hanya mode fundamen saja yang bekerja dalam analisis gelombang menggunakan sumber pasif. Dengan demikian, sumber gelombang pasif tidak direkomendasikan untuk digunakan dalam pengukuran SASW pada profil perkerasan jalan.

4.3.2 Sensor Gelombang

Gucunski (1991) menjelaskan bahwa terdapat tiga faktor dalam penggunaan sensor yang dapat mempengaruhi pengukuran gelombang permukaan yaitu rentang frekuensi sensor yang digunakan, faktor kepekaan sensor dan kontak (*coupling*) antara sensor dan permukaan media. Frekuensi yang biasa diamati untuk karakterisasi sub-permukaan pada media tanah adalah dalam rentang 2 hingga 100 Hz untuk kedalaman profil tanah dari 0 hingga 200 m (Yoon, 2005). Sementara itu, bahan yang lebih kaku seperti perkerasan lentur jalan memerlukan frekuensi yang lebih tinggi yaitu antara 6 hingga 12 kHz dan perkerasan kaku dalam rentang antara 10 hingga 18 kHz (Nazarian, 1984;

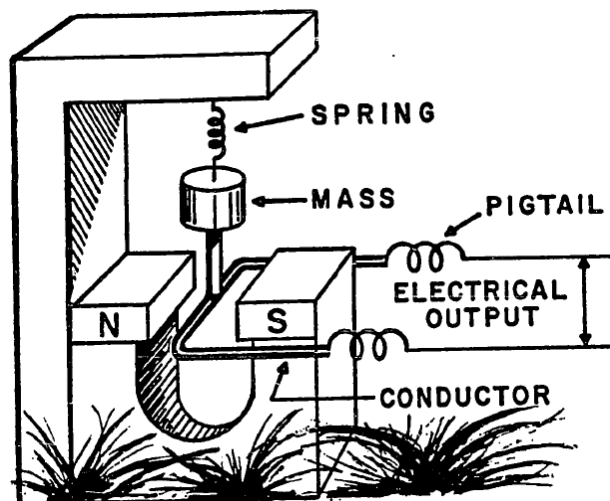
Rosyidi, 2004). Dengan demikian, jenis sensor perlu digunakan dalam pengukuran harus dipilih dengan tepat dan disesuaikan dengan rentang frekuensi yang diamati.

Selain rentang frekuensi, sensor yang mempunyai kepekaan yang tinggi dan resolusi yang baik menjadi pertimbangan dalam pemilihan sensor. Terdapat dua jenis sensor yang biasa digunakan dalam pengujian gelombang permukaan yaitu transduser kecepatan tegak atau juga dikenali sebagai geofon dan transduser akselerasi atau yang dikenali sebagai akselerometer.

1. Geofon

Sensor geofon biasanya digunakan untuk mengukur gelombang R yang merambat dengan frekuensi rendah. Geofon merupakan sistem magnet-kumparan terdiri dari bagian pemberat (massa), pegas dan kumparan (*coil*) yang dililitkan pada massa. Kumparan diletakkan pada posisi yang memotong medan magnet. Gambar 4.6 menunjukkan skema sistem geofon sebagai sensor pengukuran gelombang permukaan.

Sistem kerja geofon dapat dijelaskan sebagai berikut. Jika suatu gelombang mekanik dirambatkan melalui geofon ini, maka komponen magnet akan bergerak akibat getaran, namun massa (pemberat) akan tetap pada tempatnya dengan sedikit pergerakan yang selanjutnya menimbulkan pergerakan relatif yang terjadi pada kumparan dan magnet. Pergerakan ini membangkitkan suatu voltase elektrik dalam kumparan yang nilai proporsional terhadap kecepatan antara kumparan dan magnet.

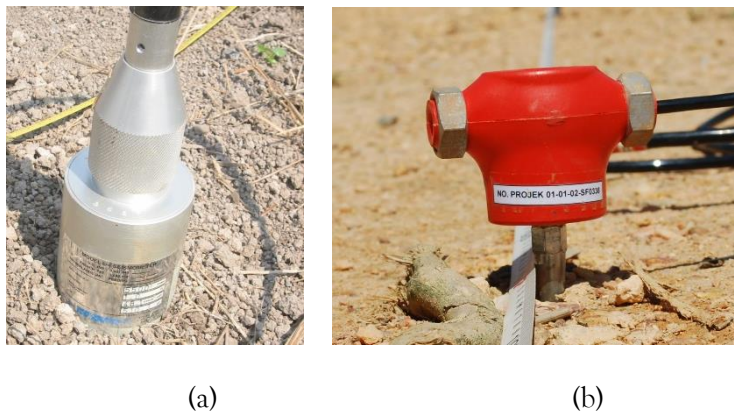


Gambar 4.6: Komponen dan sistem dalam geofon (Nazarian, 1984)

Sistem geofon dapat dipelajari sebagai sistem mekanik dengan derajat kebebasan tunggal (*one-degree-of-freedom*). Untuk mendisain sebuah geofon, parameter frekuensi natural, transduktivitas (*transducitivity*) dan redaman harus dipertimbangkan. Frekuensi natural merupakan frekuensi yang tidak teredam dari sebuah sistem. Transduktivitas

sendiri merupakan faktor yang secara proporsional menggambarkan nilai konversi antara kecepatan aktual dan voltase elektrik yang dikeluarkan oleh geofon, yang dapat dipertimbangkan sebagai faktor kalibrasi, sedangkan redaman dalam sistem adalah pengurangan amplitudo getaran yang direkam terhadap waktu.

Contoh geofon diberikan dalam Gambar 4.7a, yang merupakan geofon model L-4 Seismometer dengan frekuensi natural 2,8 Hz dan konstanta kepekaan sinyal geofon 7.33 V/In/s dengan nilai redaman minimal 0,28. Geofon ini dapat mengesan frekuensi gelombang R secara efektif sehingga 200 Hz. Contoh lainnya adalah geofon yang berfrekuensi natural yang lebih tinggi, yaitu 4,5 Hz yang dilengkapi *spike* atau paku untuk memudahkan instalasi geofon di atas permukaan media tanah (Gambar 4.7b).



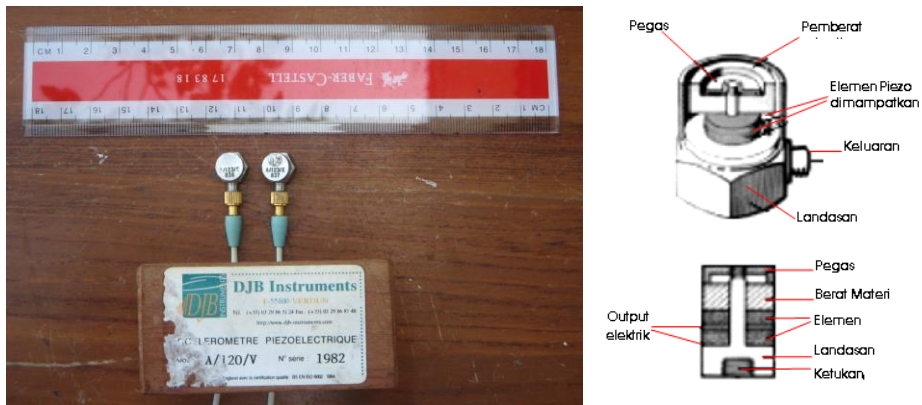
Gambar 4.7: (a) Geofon model L-4 Seismometer; (b) geofon yang dilengkapi dengan *spike* (paku)

2. Akselerometer

Akselerometer yang biasa digunakan dalam pengukuran gelombang permukaan adalah jenis piezoelektrik. Contohnya adalah akselerometer simetri tunggal misalnya dari model DJB model A/123/E yang memiliki rentang reaksi frekuensi $\pm 5\%$ pada 1,2 hingga 20 kHz (Gambar 4.8). Frekuensi resonan dalam sensor DJB ini adalah 50 kHz dengan kepekaan 7 mV/g. Gambar 4.8 juga menunjukkan detail informasi mengenai bagian dan komponen penting dalam sensor piezoelektrik. Sensor ini bekerja dengan mengalirkan energi elektrik ke unit akuisisi dari perpindahan partikel gelombang seismik yang diterima oleh pelat landasan di atas permukaan media. Pemilihan sensor ini didasarkan atas kemampuannya untuk mendeteksi dan merekam getaran dari rentang frekuensi menengah hingga frekuensi tinggi. Sensor akselerometer sangat sesuai untuk digunakan dalam pengukuran lapisan permukaan perkerasan jalan.

Untuk memastikan bahwa frekuensi sinyal gelombang permukaan yang diterima sensor adalah sama dengan frekuensi rambatan gelombangnya, akselerometer yang digunakan perlu dikalibrasi memakai kalibrator sinyal. Contoh kalibrator yang bisa

digunakan adalah SN 412 Piezotronics 394-2060-80 Model No.394B06 dengan frekuensi (deviasi 1%) = 79,6 Hz, Akselerasi unit g (ms^{-2}) rms = 1,00 (9,81). Kalibrator ini memiliki ukuran fisik 51 mm diameter dan 134 mm panjang, dengan berat 600 g, yang merupakan produksi dari PCB Piezotronics, Walden Ave, New York. Gambar 4.9 menunjukkan proses kalibrasi yang dilakukan terhadap sensor akselerometer dan kalibrator yang digunakan. Kalibrator ini bekerja dengan memberikan sinyal terukur dengan frekuensi dan magnitude tertentu (misalnya PCB Piezotronics dalam contoh ini, 79,6 Hz dan 120 dB dengan $\pm 1\%$ RMS 9,81 g - angka akselerasi: $1,000 \pm 0,1 m/s^{-2}$). Sensor yang diletakkan di atas kalibrator, akan memberikan respon terhadap sinyal yang diterima. Selanjutnya apabila frekuensi dari kalibrator dan sensor tidak sama atau sesuai, maka ukuran sensitifitas sensor perlu disesuaikan hingga ukuran frekuensi kalibrator dan sensor adalah sama. Tabel 4.2 menunjukkan contoh ukuran sensitifitas yang terkalibrasi dari proses kalibrasi terhadap akselerometer.



Gambar 4.8: Sensor akselerometer yang digunakan dalam penelitian; tampak dari atas (ukuran diameter 6 mm) dan sketsa detil sensor piezoelektrik (Rosyidi, 2013)



Gambar 4.9: (a) Proses kalibrasi sensor; kalibrator dan sensor dan (b) susunan konfigurasi dalam proses kalibrasi (Rosyidi, 2013)

Tabel 4.2: Contoh hasil kalibrasi sensitivitas sensor

Jenis Sensor	Informasi Sensor		Sensitivitas	
	Kode	Unit Pengukuran	Sebelum Kalibrasi	Setelah Kalibrasi
Akselerometer	DJB 836	V/m/s ⁻²	8.838e ⁻⁰⁴	8.831e ⁻⁰⁶
	DJB 837	V/m/s ⁻²	7.938e ⁻⁰⁴	9.966e ⁻⁰⁶
	DJB 1982	V/m/s ⁻²	4.179e ⁻⁰⁶	4.899e ⁻⁰⁶

Faktor lain yang mempengaruhi kualitas sinyal yang diterima adalah faktor bidang kontak antara sensor dengan media. Untuk sensor yang diletakkan di atas permukaan perkerasan jalan, lem cair (*liquid glue*) dapat digunakan sebagai bahan perekat untuk mendapatkan bidang kontak yang baik antara sensor dan media. Untuk bidang kontak pada permukaan tanah, sebagian badan sensor perlu ditusukkan ke dalam tanah sehingga sensor dipastikan berada dalam keadaan yang tegak dan stabil. Beberapa sensor geofon untuk dilengkapi peralatan tambahan seperti *spike* guna memudahkan instalasi sensor ke media tanah dan memastikan terjadinya bidang kontak yang baik antara sensor dan tanah.

4.3.3 Penganalisis Spektrum

Penganalisis spektrum merupakan peralatan osiloskop dan perekam data gelombang dalam bentuk digital. Peralatan penganalisis spektrum terdiri dari satu unit akuisisi (*acquisition unit*) yang dihubungkan kepada komputer. Perpindahan gerak partikel gelombang R yang diterima sensor adalah data analog akselerasi yang diubah ke dalam bentuk digital melalui unit akuisisi dan seterusnya dijalankan operasi spektrum oleh komputer.

Contoh unit akuisisi yang bisa digunakan dalam pengukuran gelombang permukaan adalah unit akuisisi Harmonie 01dB berspesifikasi IEC 651-804 tipe 1 (Gambar 4.10) yang diproduksi oleh 01dB. Unit *Harmonie* ini berukuran 110 x 35 x 220 mm dengan berat 700 grams yang dipasangkan dengan empat saluran input analog dari sensor dan satu saluran output untuk kartu PC standar (PCMCIA) pada komputer. Wilayah dinamik maksimum yang dapat diterima oleh penganalisis spektrum adalah 120 dB yang bergantung kepada kepekaan sensor (01dB, 2001). Sebuah perangkat lunak dengan sistem pengoperasian *fast Fourier transform* (FFT) diinstalasikan dalam komputer untuk operasi spektrum data digital yang berkemampuan menjalankan analisis frekuensi sampel tinggi dan spektrum frekuensi mencukupi (misalnya hingga 3200 garis). Contoh penganalisis spektrum lain yang digunakan dapat digunakan dalam pengukuran gelombang mekanik adalah penganalisis spektrum multi-channel, misalnya Brüel dan Kjør PULSE Type 3560-D (Gambar 4.11) yang diproduksi oleh Brüel dan Kjør (2006). Pemilihan penganalisis spektrum ini disesuaikan dengan kemampuan operasi unit akuisisi dan perangkat lunak operasi spektrumnya. Meskipun

demikian, untuk pengukuran gelombang seismik permukaan pada investigasi sub-permukaan media tanah tidak memerlukan unit akuisisi yang berkapasitas operasi frekuensi spektrum yang tinggi.



Gambar 4.10: Penganalisis *Harmonie* (a) yang disambungkan kepada komputer (b) untuk pengoperasian peralatan dan fungsi spektrum (Rosyidi, 2013)



Gambar 4.11: Satu set penganalisis spektrum PULSE dan aksesoriya yang digunakan dalam pengukuran (Rosyidi, 2013)

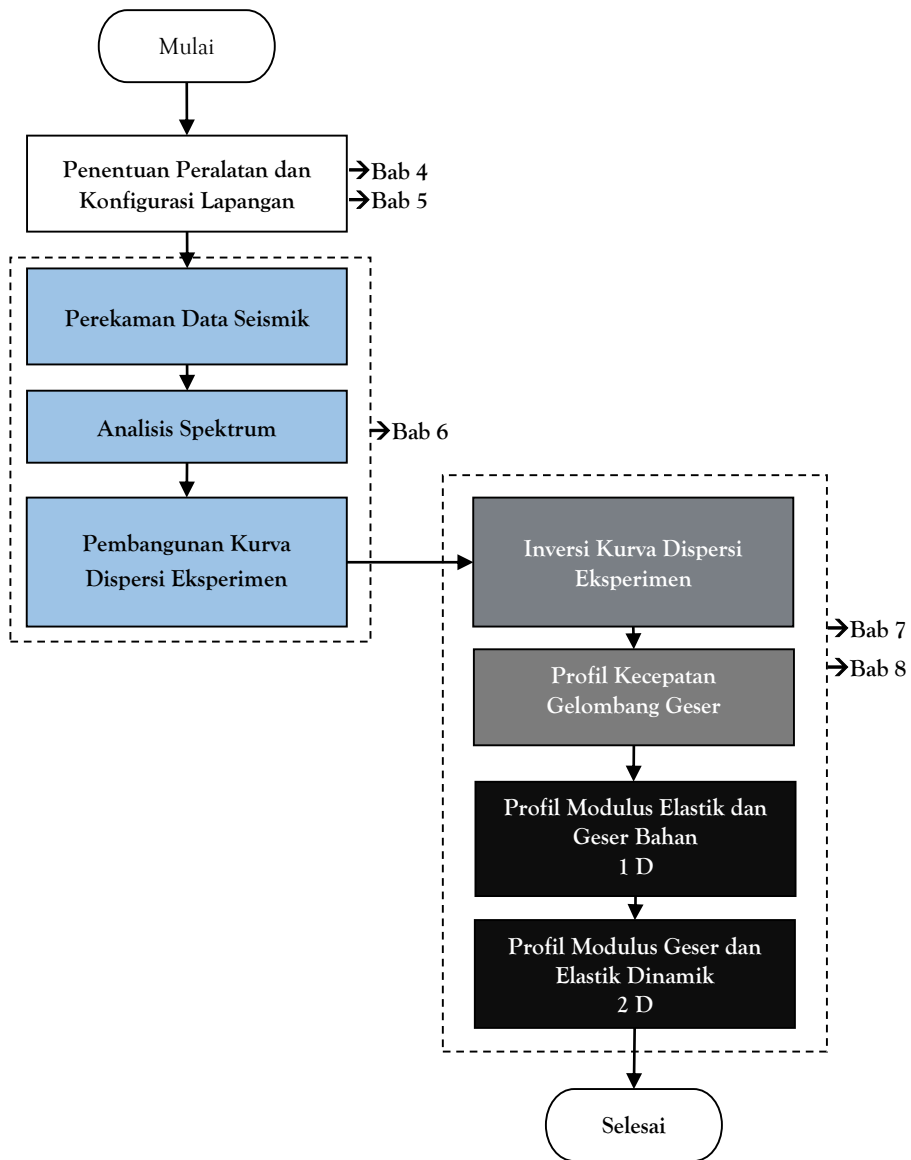
5

KONFIGURASI LAPANGAN UNTUK PENGUKURAN PROFIL JALAN

5.1 TAHAPAN ANALISIS DALAM TEKNIK SASW

Teknik SASW terdiri dari tiga bagian utama, yaitu (i) merekam data seismik lapangan, (ii) membangun kurva dispersi kecepatan gelombang fase eksperimen berdasarkan data spektrum beda fase dari hasil pengukuran di lapangan, dan (iii) menghasilkan profil kecepatan gelombang geser berdasarkan kurva dispersi eksperimen menggunakan teknik inversi. Gambar 5.1 menjelaskan urutan analisis yang digunakan dalam metode SASW secara lengkap. Pemilihan peralatan yang sesuai dengan keperluan pengambilan data menjadi bagian awal yang terpenting untuk keberhasilan dalam memperoleh data seismik yang baik. Dalam Bab 4 sebelumnya telah dijelaskan peralatan pengukuran yang diperlukan dari pemilihan sumber gelombang, penentuan sensor dan penggunaan penganalisis spektrum. Langkah selanjutnya adalah melakukan pengambilan data dengan menentukan konfigurasi lapangan yang sesuai dan mengikuti prosedur perekaman data seismik. Setelah dilakukan pengambilan data seismik dalam domain waktu, dilakukan proses transformasi data kepada domain frekuensi dan melakukan analisis spektrum menggunakan persamaan-persamaan sebagaimana yang telah dijelaskan dalam Bab 3. Data beda fase dari spektrum gelombang fungsi transfer seterusnya diproses untuk mendapatkan kurva dispersi eksperimen kecepatan fase terhadap frekuensi dan panjang gelombangnya (Bab 6). Berbasis data kurva dispersi eksperimen ini, analisis inversi dilakukan untuk memperoleh profil kecepatan gelombang geser dan modulus bahan (Bab 7). Dari beberapa profil perkerasan yang dihasilkan dari setiap pengukuran SASW, jika digabungkan akan mendapatkan profil 2 dimensi (tomografi) yang memudahkan bagi insinyur untuk mengamati perubahan nilai modulus pada setiap lapisan perkerasan jalan.

Dalam bab ini akan diuraikan konfigurasi geometrik dan prosedur pengujian di lapangan untuk pengambilan data dalam metode SASW. Suatu analisis penentuan jarak antar sensor dan wilayah frekuensi yang dikehendaki (*interested frequency range*) pada setiap pengukuran juga diberikan termasuk contoh perhitungannya.



Gambar 5.1: Bagan alir analisis dalam teknik SASW

5.2 PENGATURAN SUMBER GELOMBANG DAN SENSOR

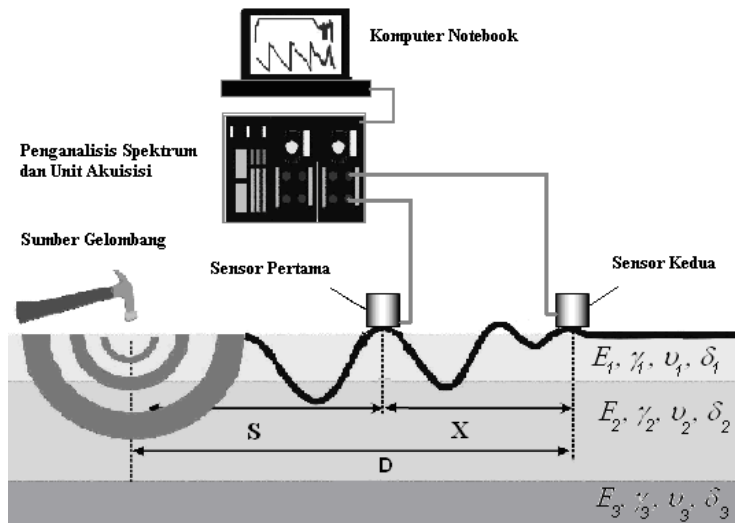
Salah satu aspek penting dalam keberhasilan pengambilan data dalam teknik SASW adalah penggunaan sumber gelombang yang tepat dan pengaturan jarak sensor yang

sesuai. Faktor-faktor yang mempengaruhi penentuan jarak antar sensor telah pelajari oleh Heisey et al. (1982), yang selanjutnya dalam pengukuran SASW dikenal sebagai kriteria Heisey. Faktor-faktor yang tersebut antara lain: kecepatan gelombang pada material, kedalaman investigasi, rentang frekuensi, sifat pengurangan gelombang dan sensitivitas instrumen sensor dan perekam data (ADC). Heisey et al. (1982) merekomendasikan bahwa jarak antar sensor (X), nilainya harus kurang dari dua kali panjang gelombang dan lebih besar dari sepertiga panjang gelombangnya. Jarak terdekat antara sumber gelombang dan sensor direkomendasikan sama dengan jarak antar sensornya. Rekomendasi ini menjadi suatu acuan penentuan jarak antar sensor dalam pengukuran SASW yang dituliskan dalam hubungan:

$$\frac{\lambda_{\max}}{3} \leq X \leq 2\lambda_{\min} \quad (5.1)$$

$$S = X \quad (5.2)$$

dengan, S merupakan jarak antara sumber gelombang dengan sensor terdekat, sedangkan X merupakan jarak antar sensor (Gambar 5.1). Batas atas pada panjang gelombang digunakan untuk menghindari kesalahan yang disebabkan oleh penganalisis frekuensi pada nilai terendah dari sudut fase yang terukur. Batas bawah memberikan batasan bahwa jarak panjang gelombang sangat pendek menjadikan gelombang akan berkurang secara cepat.



Gambar 5.1: Pengaturan sensor dan sumber gelombang pengukuran SASW

Pada pengukuran lapisan permukaan jalan, gelombang tubuh (gelombang P dan gelombang S) dipastikan akan merambat lebih cepat dibandingkan gelombang permukaan dan mempengaruhi hasil rekaman sinyal seismik. Fenomena ini dikenali sebagai pengaruh zona dekat (*near field effect*). Oleh karena itu, jarak terpendek antara sumber dan sensor (S) terdekat perlu diperhitungkan dengan tepat supaya energi gelombang tubuh secara dominan dapat diredam sebelum mencapai pada sensor pertama. Tabel 5.1 menunjukkan beberapa kriteria penentuan jarak minimum sensor dengan sumber gelombang serta jarak antara sensor yang diusulkan dari studi oleh beberapa peneliti sebelumnya.

Tabel 5.1: Kriteria jarak minimum sensor terhadap sumber gelombang serta jarak antara sensor dalam pengukuran SASW

Literasi	Sensor Pertama terhadap Sumber Gelombang	Jarak antara Sensor
Lysmer & Waas (1972)	$2.5\lambda < x_1$	-
Heisey et al. (1982)	$x_1 = \Delta x$	$0.33 \lambda < \Delta x < 2 \lambda$
Sanchez-Salinerio et al. (1987)	$x_1 = \Delta x$	$2 \lambda < \Delta x$
Röesset et al. (1991)	$0.5\lambda < x_1 < 2\lambda$	$0.5\lambda < \Delta x < x_1$
Gucunski & Woods (1992)	-	$0.5 \lambda < \Delta x < 4 \lambda$
Tokimatsu et al. (1991)	$0.25 \lambda < x_1 + \Delta x/2$	$0.0625 \lambda < \Delta x < \lambda$

Keterangan: x_1 adalah jarak sensor terdekat dari sumber, Δx adalah jarak antara kedua sensor dan λ adalah panjang gelombang.

Jika nilai kecepatan gelombang yang merambat pada material tidak diketahui sebelumnya, tentu akan sukar untuk menentukan berapa nilai panjang gelombangnya. Dengan demikian, untuk kepentingan praktis lapangannya, dapat menggunakan beberapa variasi jarak antar sensor yang selanjutnya dievaluasi rentang panjang gelombang manakah yang sesuai yang diperoleh dalam pengukuran. Hubungan antara jarak sensor dan panjang gelombang dituliskan kembali dalam bentuk:

$$\frac{X}{2} \leq \lambda \leq 3X \quad (5.3)$$

Prosedur selanjutnya yang dijalankan adalah dengan memilih konfigurasi geometrik, menentukan jarak antar sensor dan mereduksi data untuk menentukan panjang gelombang dan kecepatan fase.

5.3 KONFIGURASI GEOMETRIK

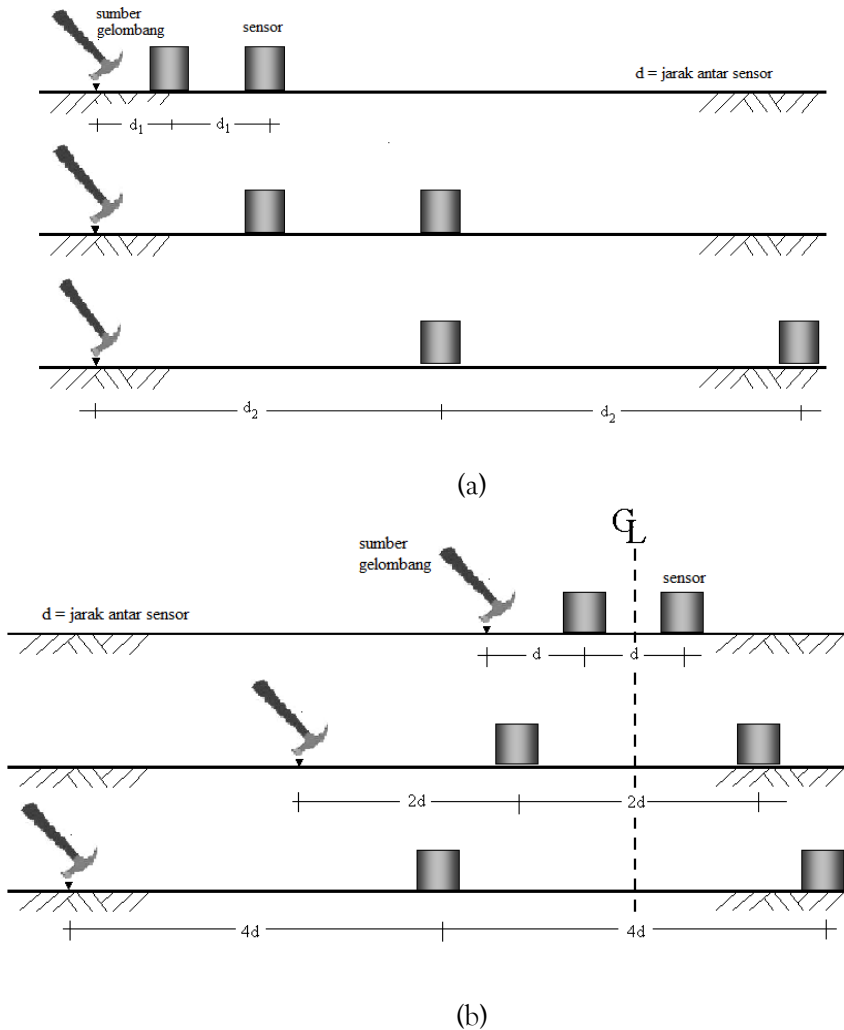
Untuk meletakkan posisi sumber gelombang dan kedudukan sensor-sensornya dalam teknik SASW untuk pengukuran perkerasan jalan pada umumnya menggunakan dua konfigurasi geometrik, yaitu:

- i. konfigurasi geometrik sensor-sumber (*common source-receiver*, CSR) dan
- ii. geometrik titik (*common mid point*, CMP); yang masing-masing konfigurasi sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5.2.

Di dalam konfigurasi CSR (Gambar 5.2a), posisi sumber gelombang diletakkan pada titik yang tetap dan sensor yang digerakkan semakin menjauh dari sensor sesuai dengan jarak antar sensor yang dikehendaki. Dalam konfigurasi CMP (Gambar 5.2b) atau yang juga disebut sebagai geometri titik tengah sensor (*common receiver mid point*, CRMP), menetapkan satu titik tengah imajiner, selanjutnya sensor dan sumber dipindahkan dengan tetap berpedoman kepada titik tengah tersebut.

Penggunaan kedua konfigurasi untuk pengukuran pada media elastik dengan sifat material per lapisannya adalah homogen, secara teorinya akan menghasilkan data yang identik. Namun jika terdapat lapisan yang tidak homogen atau sifat elastisitas materialnya bervariasi, konfigurasi CMP lebih direkomendasikan untuk digunakan.

Keunggulan menggunakan konfigurasi CMP adalah kurva dispersi pengujian yang dihasilkan lebih akurat dalam pedeteksian sifat lapisan sub-permukaan dibandingkan metode CSR. Kurva dispersinya pun lebih berpola dan tidak menyebar (Heisey et al., 1982; Nazarian, 1984). Dengan demikian, konfigurasi paling sering digunakan untuk pengukuran SASW adalah konfigurasi geometri CMP. Penggunaan CMP/CRMP, juga mempertimbangkan penggunaan jarak antar sensor dan jarak sensor ke sumber gelombang nilainya sama sesuai kriteria Heisey. Dalam teknik SASW, wilayah material yang berada di antara sensor menjadi pertimbangan penting, karena kecepatan gelombang yang diukur adalah kecepatan gelombang permukaan yang merambat pada wilayah tersebut.



Gambar 5.2: Konfigurasi geometrik dalam pengukuran SASW: (a) geometri sensor-sumber (CSR) dan (b) geometri titik tengah (CRMP)

5.4 PROSEDUR PENGUJIAN LAPANGAN

Proses pengumpulan data gelombang dalam pengujian SASW menggunakan konfigurasi geometrik CMP secara berurutan dijelaskan sebagai berikut :

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

Jika jarak terpendek telah ditentukan, nilai jarak ini selanjutnya ditambahkan secara berganda, biasanya dimulai dengan jarak yang terpendek. Misalnya, jarak antar sensor terpendek adalah 10 cm, maka jarak sensor selanjutnya digunakan $2 \times 10 \text{ cm} = 20 \text{ cm}$, dan pengukuran selanjutnya adalah kelipatan gandanya. Lebih jelasnya ditunjukkan dalam contoh Tabel 5.2 berikut ini.

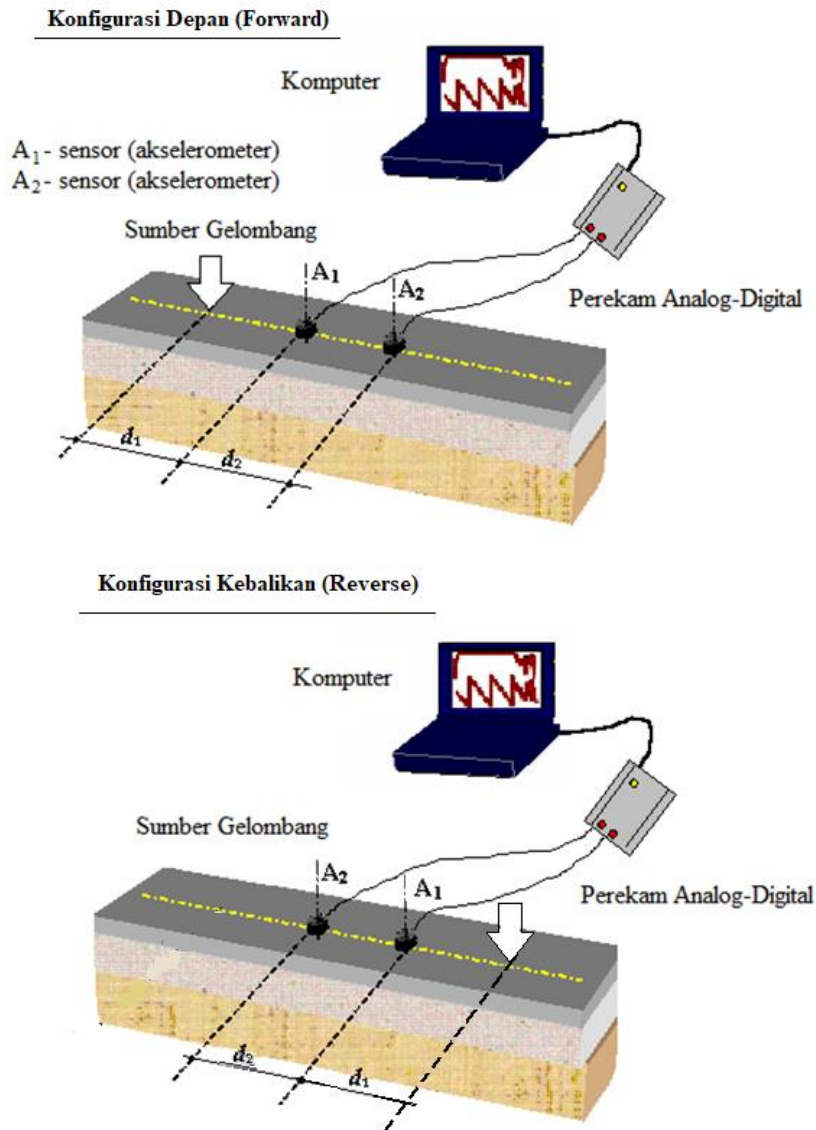
Tabel 5.2: Contoh penentuan jarak antar sensor

Jarak antar Sensor	Jarak Terukur
Pengukuran 1 (jarak sensor terpendek)	10 cm
Pengukuran 2	$10 \times 2 = 20 \text{ cm}$
Pengukuran 3	$20 \times 2 = 40 \text{ cm}$
Pengukuran 4	$40 \times 2 = 80 \text{ cm}$
dan seterusnya.	...

Perubahan jarak sensor ini bertujuan untuk memperoleh seluruh wilayah panjang gelombang yang dirancang.

- ii) Selanjutnya ditentukan suatu sumber gelombang dan sepasang sensor yang tepat untuk setiap wilayah frekuensi yang telah ditentukan. Nilai wilayah frekuensi yang dihasilkan oleh sesuatu sumber bergantung kepada bentuk dan berat sumber tersebut. Oleh yang demikian itu, percobaan pengukuran (*pilot study*) terhadap jenis sumber gelombang yang akan digunakan perlu dilakukan untuk menghasilkan pergerakan gelombang dalam wilayah frekuensi yang diperlukan dalam sesuatu pengukuran. Beberapa set berat dan bentuk sumber gelombang perlu diuji coba bagi memperoleh sinyal yang berkualitas baik.
- iii) 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 (lihat Gambar 5.1). Sensor juga harus terlekat secara baik di permukaan media 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.

- iv) Gelombang seismik dihasilkan dari sumber gelombang yang dijatuhkan atau dipukulkan dengan energi terbatas ke atas permukaan media guna menyalurkan energi seismik tersebut menuju ke kedua sensor. Pengukuran dan perekaman gelombang dilakukan secara berulang kali untuk memperoleh sinyal rata-rata dalam domain frekuensi. Rata-rata sinyal yang diperoleh melalui pengulangan pengukuran dapat menghilangkan pengaruh derau/gangguan acak (*random noise*) dan sinyal yang tidak jelas pada proses perekaman data (Nazarian, 1984; Karl, 1989). Pengulangan pengukuran dapat dilakukan sebanyak 5 kali pada setiap jarak antar sensor.
- v) Penggunaan konfigurasi pengukuran profil depan dan kebalikan (*forward dan reverse measurement*) perlu dilakukan pada setiap konfigurasi jarak antar sensor. Dalam proses pengukuran ini, kedudukan sensor tidak berubah, namun posisi sumber gelombang akan dipindahkan pada sisi susunan yang berlawanan. Identitas sensor akan berubah, dimana sebelumnya sensor terdekat dengan sumber gelombang akan menjadi sensor yang terjauh dari sumber gelombang, dan sebaliknya. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi apakah terdapat lapisan yang miring (*dip slope*) di dalam media dan menentukan konsistensi dari data spektrum gelombang yang dihasilkan akibat pengaruh dari pergeseran nilai fase internal yang terjadi dalam sensor maupun perangkat perekam data. Gambar 5.3 menunjukkan bagaimana pengaturan konfigurasi pengukuran depan dan kebalikan.
- vi) Selanjutnya, jika pengujian SASW dilakukan di atas perkerasan jalan, maka parameter suhu perlu diukur di permukaan dan di dalam lapisan permukaan media yang diuji setiap selesai pengukuran gelombang dan perekaman data oleh penganalisis spektrum. Kontrol parameter ini dapat menjelaskan pengaruh viskositas aspal dalam penentuan modulus elastik bahan lapisan perkerasan menggunakan aspal atau bitumen.
- vii) Kecepatan fase dapat dihitung secara cepat menggunakan beberapa nilai frekuensi dari spektrum fase yang diukur oleh penganalisis spektrum di lapangan. Cara ini dilakukan untuk membandingkan kecepatan fase dari hasil penganalisis spektrum dengan nilai asumsi kecepatan fase awal. Tahapan ini dijalankan bagi mengontrol hasil spektrum fase dan nilai kecepatan supaya sesuai dengan media yang diukur. Untuk mendapatkan hasil resolusi yang baik bagi kurva penyebaran lapangan, hasil spektrum fase tertutup (*unwrapping*) sebaiknya mempunyai dua hingga empat siklus kitar.
- viii) Kedudukan sensor selanjutnya diubah dan disesuaikan untuk jarak sensor dan sensor yang telah ditetapkan pada tahap pertama. Kemudian tahap dua hingga enam di atas diulangi sehingga pengujian dilakukan bagi semua jarak sensor gelombang.



Gambar 5.3: Konfigurasi pengukuran depan dan kebalikan untuk konfigurasi geometrik pengukuran titik tengah sensor (CMP)

5.5 PERENCANAAN JARAK ANTAR SENSOR

Untuk mendapatkan sampel gelombang pada lapisan dalam di suatu media, pengukuran SASW memerlukan konfigurasi beberapa set ukuran jarak sensor dan pemilihan frekuensi sumber yang tepat untuk memberikan hasil atau data yang akurat.

Untuk panjang gelombang terpendek, jarak sensor adalah satu hingga tiga kali panjang gelombang minimum. Jika spektrum beda fase yang dihasilkan menunjukkan kualitas sinyal yang baik, yaitu cukup hanya dengan satu siklus (*cycle*) saja, maka jarak sensor yang diperlukan untuk mengukur gelombang sebaiknya adalah lebih pendek dari satu kali panjang gelombang minimum.

Untuk menghasilkan gelombang yang terpanjang, jarak sensor yang diperlukan adalah $\frac{1}{2}$ hingga $\frac{1}{3}$ panjang gelombang yang direncanakan. Heisey, *dkk.* (1982) memberikan ulasan bahwa panjang gelombang yang direncanakan dapat diambil sebagai estimasi penetrasi kedalaman gelombang dari permukaan media. Setelah jarak sensor minimum dan maksimum diperoleh, ukuran jarak yang lain ditentukan berganda dimulai dari jarak terpendek. Pengukuran ini perlu dilakukan untuk memperoleh superposisi gelombang yang cukup bagi mendapatkan kurva dispersi yang baik (Rosyidi, 2004).

Sebagai ilustrasi bagaimana merencanakan jarak antar sensor dalam pengukuran SASW, berikut ini satu studi kasus yang diterapkan di struktur perkerasan jalan. Perancangan konfigurasi pengukuran dalam pengujian dimulai dengan mengasumsikan bahwa perkerasan jalan terdiri dari tiga lapisan utama yaitu lapisan permukaan, fondasi dan tanah dasar. Gelombang direncanakan dapat mendeteksi hingga lapisan terbawah (tanah dasar) sehingga diasumsikan panjang gelombang yang diperlukan dapat berpenetrasi hingga kedalaman 300 cm. Berdasarkan asumsi ini, maka jarak sensor minimum dan maksimum dapat ditentukan sebagai berikut:

Jarak Sensor Terpendek

Untuk panjang gelombang terpendek, jarak sensor dihitung satu hingga tiga kali panjang gelombang minimum. Dengan demikian, rentang ukuran minimum jarak sensor terpendek ditentukan 5 hingga 15 cm (1 hingga 3×5 cm) sesuai kriteria Heisey. Apabila spektrum beda fase menunjukkan kualitas sinyal yang baik maka hanya dengan satu siklus saja, sehingga jarak sensor yang diperlukan untuk mengukur gelombang dengan panjang 5 cm sebaiknya lebih pendek dari satu kali panjang gelombang minimum atau kurang dari 5 cm.

Jarak Sensor Terpanjang

Untuk menghasilkan gelombang yang lebih panjang, jarak sensor yang diperlukan adalah 150 hingga 225 cm. Nilai ini didapatkan dari $\frac{1}{2}$ hingga $\frac{1}{3}$ panjang gelombang maksimum yang direncanakan untuk mencapai kedalaman 300 cm. Bagi memudahkan pelaksanaan pengujian di lapangan, jarak terpanjang ditentukan sebagai 160 cm.

Setelah jarak sensor minimum dan maksimum ditentukan yaitu 5 cm dan 160 cm, maka ukuran jarak sensor lainnya ditentukan secara berganda yaitu 10, 20, 40 dan 80 cm. Dengan demikian, satu set jarak sensor yang diperlukan dalam investigasi SASW pada perkerasan jalan adalah 5, 10, 20, 40, 80 dan 160 cm. Pengukuran dengan cara tersebut dimaksudkan untuk mendapatkan superposisi gelombang yang memadai bagi mendapatkan kurva disperse kecepatan fase yang baik.

Rentang Frekuensi yang Diamati

Setelah set jarak antara sensor ditentukan, rentang frekuensi sumber gelombang juga perlu direncanakan untuk mendapatkan corak gelombang permukaan yang semestinya diperoleh pada setiap jarak sensor tersebut. Sebagai contoh, diambil jarak sensor 20 cm, yang direncanakan mampu mendeteksi lapisan fondasi jalan dengan kecepatan geser 500 m/s (nilai V_s merupakan asumsi berdasarkan studi-studi sebelumnya) untuk panjang gelombang pada $\frac{1}{3}$ hingga 2 kali jarak sensor yang ditentukan oleh kriteria Heisey, maka nilai frekuensi maksimum dan minimum dapat ditentukan dari panjang gelombangnya sebagai berikut:

$$f_{\text{maksimum}} = \frac{V_{ph}}{\lambda_{\text{minimum}}} \quad \text{dan} \quad f_{\text{minimum}} = \frac{V_{ph}}{\lambda_{\text{maksimum}}} \quad (5.4)$$

menggunakan hubungan di atas, maka dapatkan:

$$f_{\text{maksimum}} = \frac{(500 \times 0.9)}{\left\{ \frac{0.2}{3} \right\}} = 6750 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

$$f_{\text{minimum}} = \frac{(500 \times 0.9)}{0.2 \times 2} = 1125 \text{ Hz} \quad (5.6)$$

Dari perhitungan di atas, rentang frekuensi sumber gelombang untuk jarak sensor 20 cm diasumsikan mempunyai nilai antara 1125 hingga 6750 Hz supaya dapat mendeteksi perambatan gelombang dalam lapisan fondasi. Melalui proses perhitungan yang sama, seterusnya dapat ditentukan rentang frekuensi sumber gelombang untuk jarak sensor yang lain sesuai dengan pedeteksian lapisan media yang diharapkan. Rentang frekuensi yang telah diperoleh digunakan sebagai dasar pemilihan sumber gelombang yang lebih tepat. Tabel 5.3 menunjukkan rentang frekuensi yang diperlukan dari satu set jarak sensor yang telah ditentukan dalam contoh ini.

Tabel 5.3: Rencana rentang frekuensi untuk pengujian SASW

Jarak sensor (mm)	Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) yang direncanakan (m/s)	Rentang frekuensi rencana (Hz) untuk pengukuran
50	1000	9000 - 54000
100	1000	4500 - 27000
200	500	1125 - 6750
400	500	562,5 - 3375
800	300	168,75 - 1012,5
1600	300	84,375 - 506,25

6

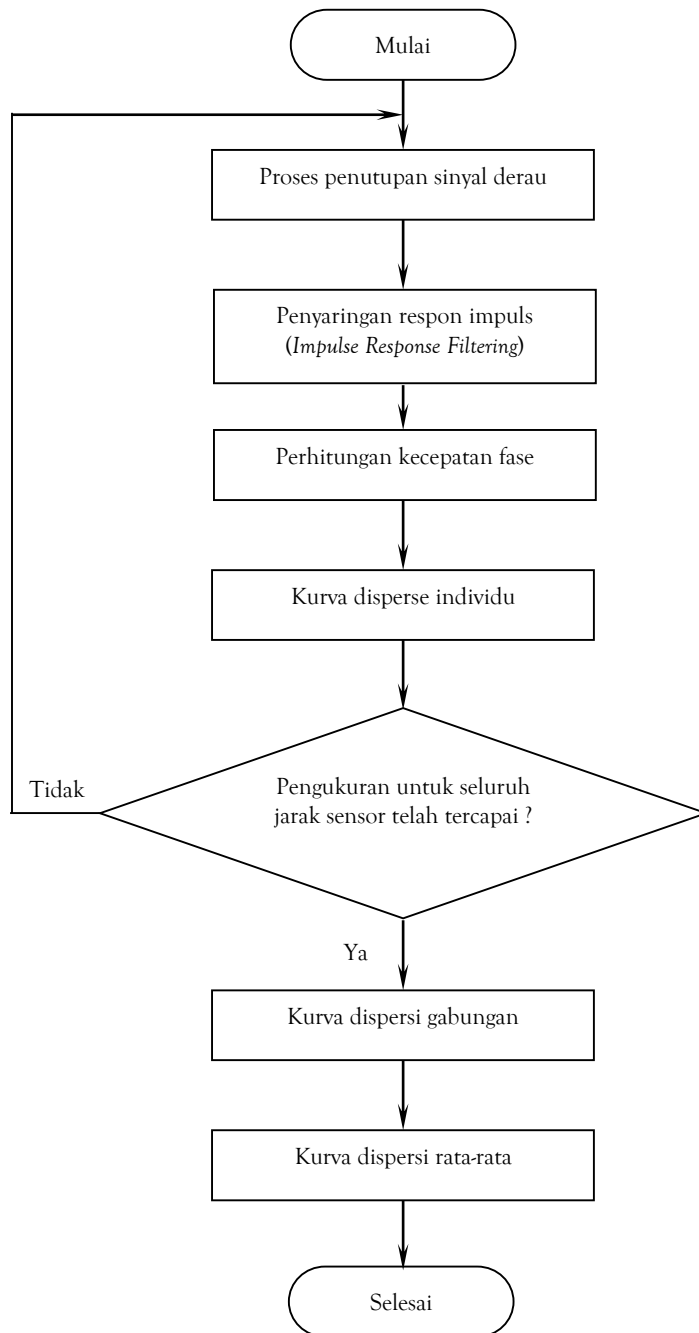
PEMBANGUNAN KURVA DISPERSI KECEPATAN FASE

6.1 PENGANTAR

Kurva dispersi kecepatan fase dihasilkan untuk menjelaskan hubungan antara kecepatan fase terhadap variasi nilai frekuensi dan panjang gelombangnya. Kurva dispersi ini dapat memberikan informasi penting mengenai stratigrafi dan tebal lapisan perkerasan jalan serta karakteristik kekakuan bahan (dalam parameter kecepatan gelombang) yang berguna dalam tahapan analisis SASW selanjutnya yaitu proses inversi. Beberapa teknik perhitungan kecepatan fase untuk menghasilkan kurva dispersi telah banyak dikembangkan, diantaranya adalah teknik *slant-stack* (McMechan & Yedlin, 1981), teknik transformasi *fk* (Nolet & Panza, 1976), teknik beda fase berdasarkan *filtering* waktu-varian (Pilant & Knopoff, 1964), teknik silang-multiplikasi (Bloch & Hales, 1968) dan metode beda fase berdasarkan spektrum fungsi perpindahan dan spektrum silang (Nazarian & Stokoe, 1984), spektogram wavelet (Rosyidi, 2009; 2017). Banyak studi telah dilakukan mengenai efektivitas dan perbandingan metode perhitungan kurva dispersi menggunakan metode-metode di atas. Secara umum, disimpulkan bahwa metode-metode tersebut dapat menghasilkan kurva dispersi eksperimen yang hasilnya relatif hampir sama. Sebagian besar perbedaannya pada waktu dalam pemrosesan kurva dan kemampuannya untuk mendeteksi kecepatan gelombang fase dan kecepatan gelombang kelompok (*group velocity*).

Dalam bab ini, penulis hanya menjelaskan penggunaan metode perhitungan kurva dispersi menggunakan metode beda fase (Nazarian & Stokoe, 1984) berdasarkan spektrum hasil transformasi Fourier. Metode ini umumnya yang digunakan dalam proses analisis SASW termasuk untuk pengukuran pada profil perkerasan jalan. Proses yang digunakan dalam metode beda fase ini dibagi kepada tiga tahapan, yaitu:

- (i). proses penutupan sinyal derau (*masking*),
- (ii) proses perbaikan sinyal dari derau, sinyal tak koheren dan pantulan gelombang menggunakan *filtering*/penyaringan respon implus, dan
- (iii) proses pembangunan kurva dispersi individu dan komposit. Ketiga tahapan dijelaskan dalam bentuk bagan alir dalam Gambar 6.1 berikut ini.



Gambar 6.1: Bagan alir proses analisis dan pembangunan kurva dispersi eksperimen kecepatan fase dalam teknik SASW

6.2 ANALISIS PENYARINGAN SINYAL (MASKING)

Penutupan (*masking*) data dilakukan untuk mendapatkan spektrum fungsi transfer yang baik. Prinsip analisis ini adalah melakukan pemisahan antara data spektrum yang baik dan yang buruk. Data spektrum yang buruk tidak diikutkan dalam proses analisis kecepatan fase yang dalam hal ini ditutup atau disembunyikan (*masking*). Analisis dilakukan pada spektrum fase terbuka dan dilaksanakan sebelum perhitungan kecepatan fase untuk plot kurva dispersi. Prosedur penutupan dilakukan mengikut kriteria berikut ini:

1. Penutupan dijalankan untuk bagian sinyal gelombang yang memiliki informasi fase berkualitas buruk. Informasi fase yang buruk dipilih berdasarkan pertimbangan bahwa data sudut fase (yang ditampilkan dalam spektrum fungsi transfer) adalah tidak mengikut corak kurva umum dalam kurva dispersi dan/atau kaitan fase antara kedua sensor (ditampilkan dalam dalam spektrum koheren) mempunyai nilai koheren kurang daripada 0,9. Sudut fase yang tidak mengikut haluan umum dapat mempunyai bentuk fluktuatif yang jelas. Kurca sudut fase dengan bentuk melengkung ke belakang dan sudut fase yang buruk biasanya dipengaruhi oleh gangguan acak ketika proses pengambilan data di lapangan.
2. Penutupan bagian kurva gelombang yang dipengaruhi oleh pengaruh zona dekat (*near field effect*) pada kurva dispersi yang ditentukan berasaskan persamaan :

$$\lambda \leq \frac{1}{2} \cdot d_1 \quad (6.1)$$

dimana:

λ = panjang gelombang

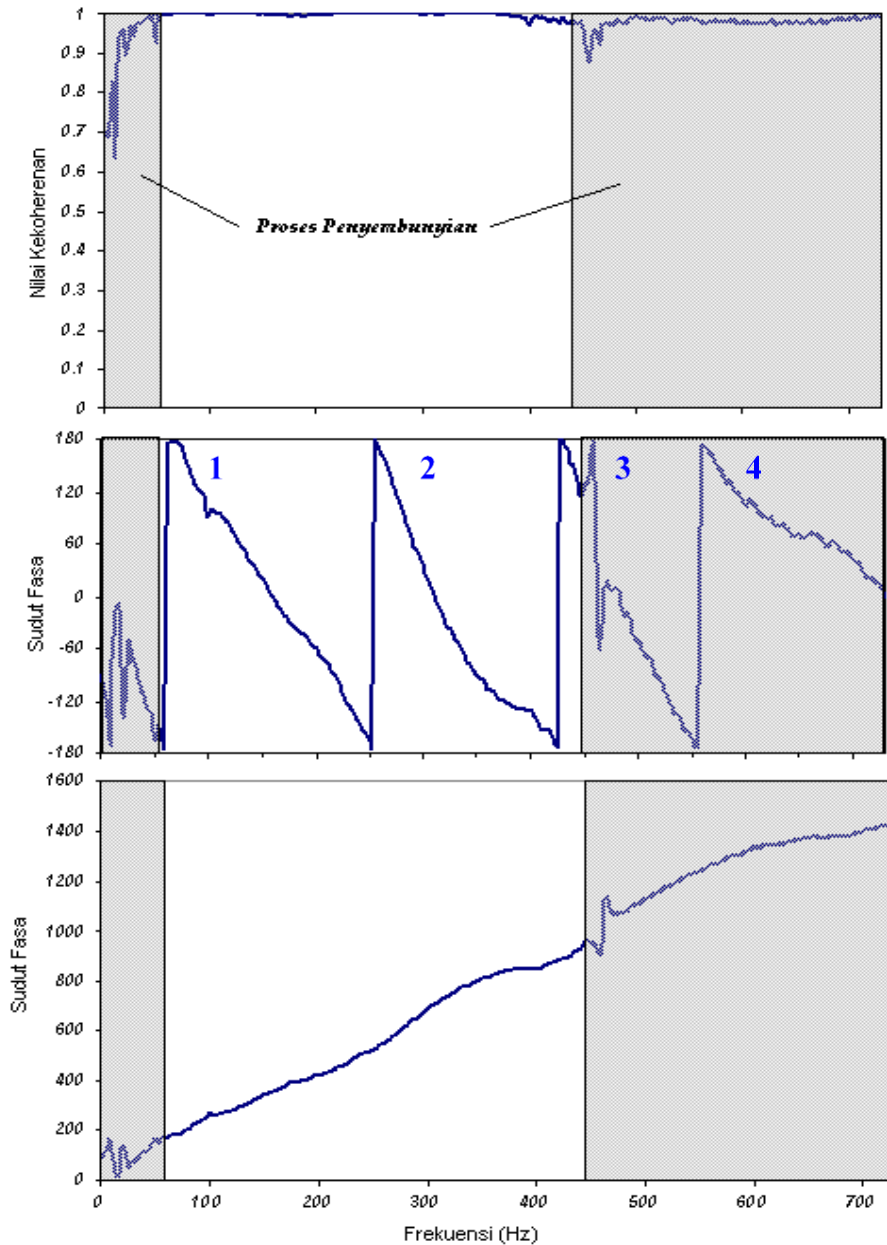
d_1 = jarak antara punca dengan sensor pertama

Untuk penutupan panjang gelombang maksimum digunakan kriteria penyaring (*filtering*) dari kriteria Heisey. Kriteria ini mensyaratkan bahwa gelombang dengan panjang yang lebih besar daripada tiga kali jarak sensor tidak perlu diperhatikan (dapat ditutup/disaring).

3. Dalam pembangunan kurva dispersi kecepatan fase diperlukan analisis jumlah siklus (*cycle number*) yang benar pada spektrum fungsi transfer tertutup (*wrapping*). Jumlah siklus ini digunakan sebagai koefisien pengkali untuk membentuk spektrum fase terbuka (*unwrapping phase spektrum*).

Pada bentuk spektrum yang jelas, bilangan jumlah pengkali siklus yang benar dapat ditentukan dengan membandingkan pengukuran spektrum fungsi transfer terbuka jarak sensor terkini dengan yang sebelumnya. Jumlah siklus yang tidak mewakili sampel jarak sensor yang ditentukan boleh ditutup atau dihilangkan.

Gambar 6.2 di bawah ini menunjukkan proses penutupan yang dijalankan kepada spektrum fase fungsi transfer yang didasarkan pemilihan nilai-nilai koheren sinyal gelombang dan kriteria penyaringan Heisey.



Gambar 6.2: Proses penutupan (*masking*) pada spektrum fase tertutup dan terbuka untuk sinyal gelombang yang jelek berasaskan nilai koheren

6.3 ANALISIS PENYARINGAN RESPON IMPULS (IMPULSE RESPONSE *Filtering*, IRF)

6.3.1. Prosedur IRF

Prosedur yang diterapkan dalam teknik penyaringan respon impuls (IRF) dilakukan mengikuti urutan berikut ini:

1. Perhitungan respon impuls sesuatu spektrum fungsi transfer dari sensor lapangan menggunakan persamaan :

$$h(t) = \int H_{YX}(f) \cdot e^{i2\pi ft} dx \quad (6.2)$$

dimana :

$h(t)$ = respon impuls

H_{YX} = fungsi transfer sinyal gelombang di antara dua sensor

e^{***} = fungsi gerak partikel gelombang harmonik.

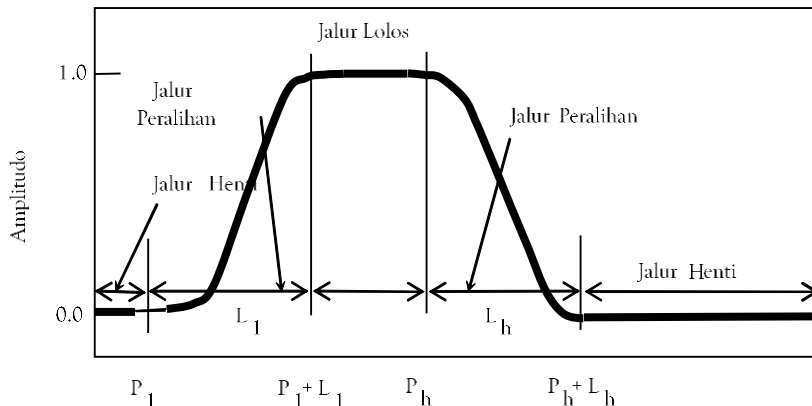
2. Pembangunan spektrogram Gabor (*gabor spectrogram*) sebagai kombinasi linear di antara fungsi waktu dan frekuensi fungsi Gaussian simpangan (Dziewonski et al. 1969). Informasi ini berguna untuk mendapatkan informasi tampilan waktu (*time window*) pada respon impuls. Desain tampilan waktu untuk mode rendah dan tinggi diperoleh dari persamaan matematik sebagai berikut ini:

$$f(n) = \begin{cases} 1, & 1 < n < P_l \\ 1/2 \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right), & P_l \leq n < P_l + L_l \\ 0, & P_l + L_l < n < P_h \\ 1/2 \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right), & P_h \leq n < P_h + L_h \\ 1, & P_h + L_h < n < N \end{cases} \quad (6.3)$$

$$f(n) = \begin{cases} 0, & 1 \leq n < P_l \\ 1/2 \left(\cos \frac{P_l + L_l - n}{L_l} \pi + 1 \right), & P_l \leq n < P_l + L_l \\ 1, & P_l + L_l < n < P_h \\ 1/2 \left(\cos \frac{n - P_l}{L_l} \pi + 1 \right), & P_h \leq n < P_h + L_h \\ 1, & P_h + L_h < n \leq N \end{cases} \quad (6.4)$$

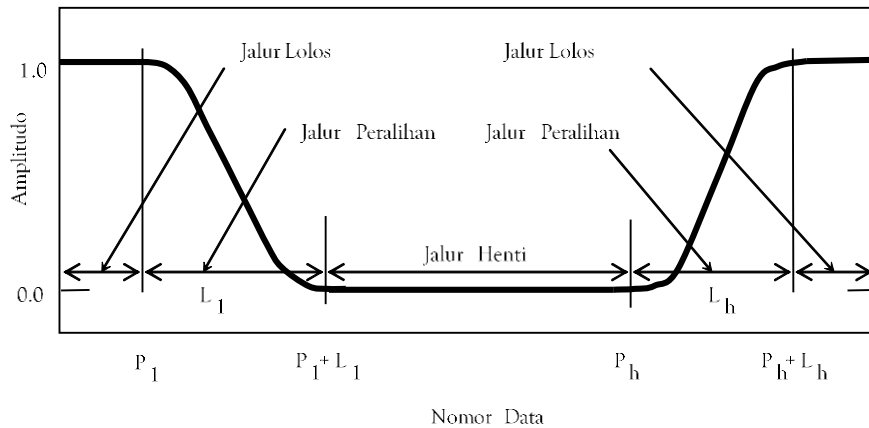
Perancangan tampilan waktu dijalankan menggunakan tiga bagian jalur yaitu jalur lolos (*passband*), jalur peralihan (*transition band*) dan jalur henti (*stopband*) sebagaimana dijelaskan dalam Gambar 6.3. Jalur lolos berbentuk garis datar yang mempunyai nilai 1 yang dirancang untuk meloloskan gelombang yang diterima sedangkan jalur henti memiliki nilai 0 yang dirancang untuk menghilangkan ketibaan gelombang selanjutnya. Jalur peralihan adalah bentuk tirus kosinus (*cosine-tapered*) untuk memberikan pertransfer yang halus di antara jalur lolos (*passband*) dan jalur henti (*stopband*). Bentuk peralihan jalur yang halus diperlukan untuk menghasilkan amplitudo spektral yang baik dari sinyal gelombang yang tersaring.

3. Perhitungan semula spektrum fungsi transfer sebagai spektrum fase “backbone” dan spektrum fase perbaikan (*enhance*) yang telah disesuaikan atau dimodifikasi dengan transformasi Fourier bagi respon impuls yang telah disaring.
4. Pembukaan (*unwrapping*) spektrum fase fungsi transfer termodifikasi untuk mode rendah dan tinggi. Spektrum akhir dibentuk dari penggabungan kedua mode rendah dan tinggi yang dipisahkan berdasarkan nilai frekuensi mode jalur peralihan (*transition band*). Untuk frekuensi sinyal gelombang yang digunakan di bawah frekuensi mode peralihan maka penyaringan gelombang mode rendah yang dijalankan, sedangkan jika frekuensi berada di atas batas peralihan, maka yang digunakan adalah penyaringan mode tinggi dapat digunakan.



Nomor Data

(a) Penyaringan untuk mode rendah

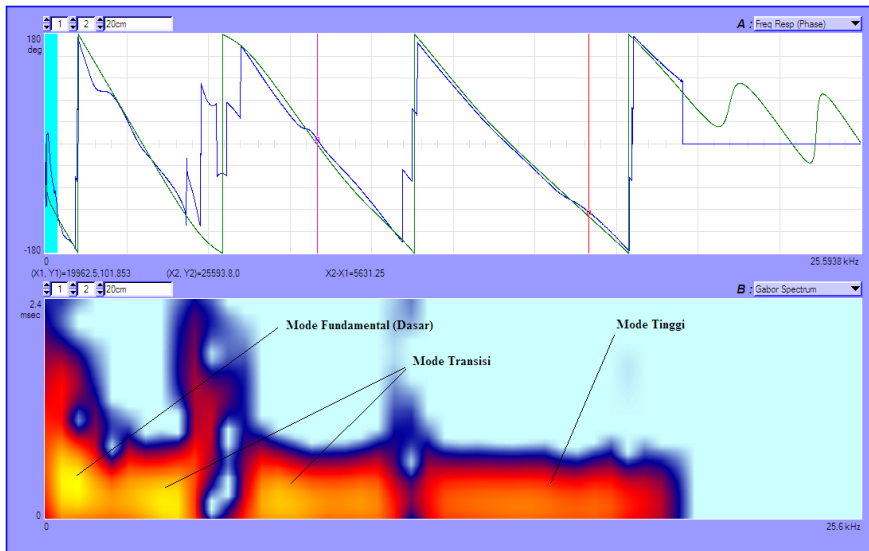


(b) Penyaringan untuk mode tinggi

Gambar 6.3: Skema proses penyaringan IRF untuk mode rendah dan mode tinggi

6.3.2. Contoh Aplikasi

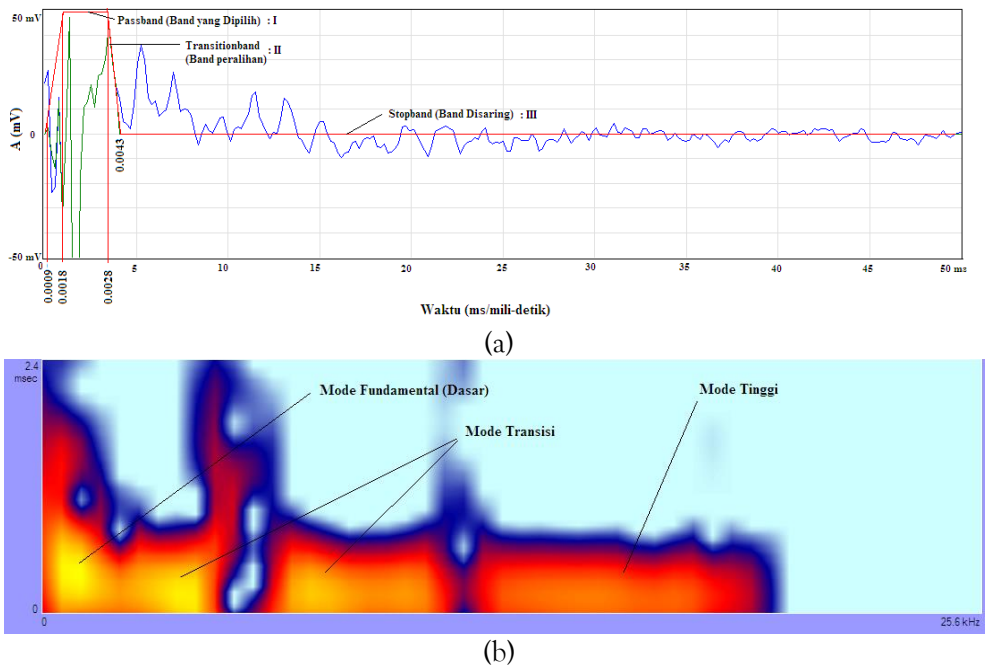
Gambar 6.4 menunjukkan analisis IRF yang dilakukan pada spektrum fase pengukuran pada perkerasan jalan di Jalan Cagak, Subang. Hasil rekonstruksi spektrum fase ditunjukkan dalam grafik berwarna hijau (garis tipis) dari hasil IRF terhadap spektrum aslinya berwarna biru (garis tebal).



Gambar 6.4: Hasil IRF pada spektrum fase dan hasil rekonstruksi spektrum fase jarak sensor 20 cm pada Jalan Cagak, Subang

Dalam Gambar 6.4 ditunjukkan bahwa analisis IRF mampu menghasilkan spektrum perbaikan dari spektrum asli hasil pengukuran. Dalam teknik IRF, spektrum fase diinversikan dalam domain waktu yang disebut sebagai respon impuls (*impulse response*). Seterusnya menggunakan persamaan kriteria penyaringan ditentukan wilayah yang akan digunakan (band/jalur lolos atau *passband*), wilayah yang akan disaring (band/jalur henti atau *stopband*) dan wilayah transisi atau peralihan (*transitionband*).

Gambar 6.5(a) menunjukkan respon impuls dari spektrum fase dari Gambar 6.4. Dalam kasus ini, digunakan penyaringan mode rendah. Kriteria waktu impuls dalam penyaringan diperoleh dari informasi spektrogram Gabor. Spektrogram Gabor ini diperoleh dari operasi konvolusi linier antara fungsi window terhadap sinyal dalam fungsi diskrit. Seterusnya sinyal diplot kembali dalam dua sumbu-aksis yaitu waktu dan frekuensi yang disebut sebagai spektrogram. Dalam kasus ini, digunakan fungsi Hanning yang dihasilkan dari fungsi dasar Gaussian. Gambar 6.5(b) menunjukkan spektrogram Gabor dari fungsi impuls yang memberikan informasi wilayah band untuk IRF.



Gambar 6.5: Respon impuls dan plotting kriteria penyaringan mode rendah berdasarkan informasi spektrogram Gabor untuk jarak sensor 20 cm

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 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.

Seterusnya, kriteria penyaringan mode rendah IRF dapat dituliskan kembali dalam nilai-nilai band seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.5(a) sebagai berikut:

$$f(n) = \begin{cases} 0, & 0 \leq n < 0.0009 \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{P_1 + L_t - n}{L_t} \pi + 1 \right) & 0.0009 \leq n < 0.0018 \\ 1, & 0.0018 < n < 0.0028 \\ \frac{1}{2} \left(\cos \frac{n - P_1}{L_t} \pi + 1 \right), & 0.0028 \leq n < 0.0043 \\ 1, & 0.0043 < n \leq 0.16 (N_{\text{maks}}) \end{cases} \quad (6.5)$$

6.4 METODE BEDA FASE (PHASE DIFFERENT METHOD)

Metode beda fase ini digunakan dalam analisis data SASW dengan pertimbangan bahwa perhitungan kecepatan gelombang dalam metode ini menggunakan parameter waktu pergerakan gelombang yang dapat ditentukan dengan cepat dan mudah. Waktu pergerakan gelombang (t) dapat dihitung menggunakan nilai beda fase (ϕ) dari spektrum gelombang fungsi transfer (*transfer function*) dari hasil analisis FFT pada data seismik gelombang.

Persamaan dasar metode ini dijelaskan sebagai berikut:

$$\phi = 2\pi f_0 t \quad (6.6)$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \quad (6.7)$$

$$V_{\text{PH}} = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (6.8)$$

dengan :

f_0 = frekuensi, d = jarak antar sensor pengesan gelombang

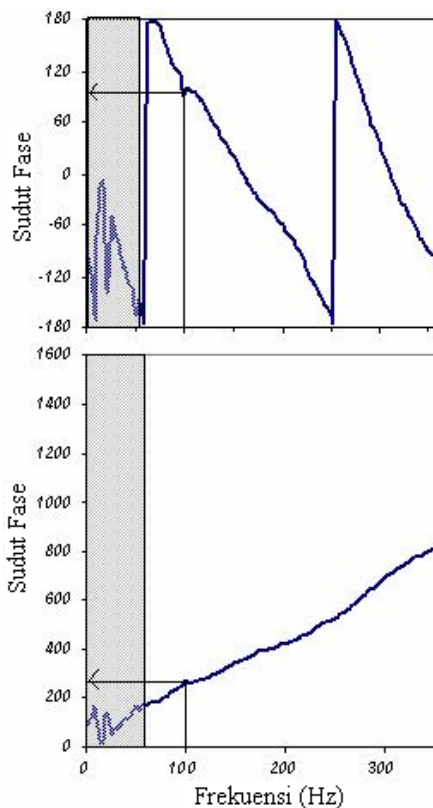
V_{PH} = kecepatan fase gelombang.

Dari hasil analisis ini didapatkan suatu kurva dispersi eksperimen individu, yang berisi informasi hubungan antara kecepatan fase dan frekuensi gelombang, dan selanjutnya

disusun menjadi kurva dispersi eksperimen komposit (gabungan) untuk seluruh data dari pengukuran setiap jarak sensor yang digunakan dalam pengujian SASW. Gambar 6.6 menunjukkan prosedur dan contoh perhitungan yang digunakan untuk menentukan kecepatan fase dan panjang gelombang guna penyusunan kurva dispersi eksperimen.

6.5 MODEL PENYEDERHANAAN KURVA DISPERSI

Model ini digunakan untuk menyederhanakan kurva dispersi eksperimen komposit. Penggunaan model penyederhaan ini dipertimbangkan kerana jumlah data yang dihasilkan oleh spektrum fungsi transfer adalah 3200 digit pada setaip kurva dispersi eksperimen individu. Hal ini menyebabkan jumlah data pada kurva dispersi komposit bisa mencapai 18.000 digit. Jumlah data yang sedemikian besar mengakibatkan lambatnya proses komputasi iterasi pada tahapan inversi dalam analisis SASW. Kurva dispersi komposit sebaiknya memiliki 20 hingga 50 data saja untuk proses analisis inversi yang baik.



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

1. Perhitungan sudut fase terbuka (unwrapping)

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

2. Waktu perambatan gelombang R

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

3. Kecepatan fase (gelombang R)

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

4. Panjang gelombang Rayleigh

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

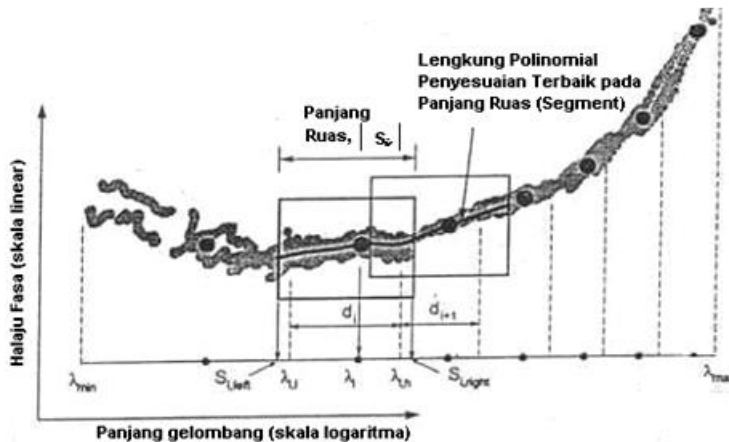
Gambar 6.6 : Contoh perhitungan kecepatan fase dari spektrum beda fase

Oleh sebab itu, kurva dispersi komposit harus disederhanakan menjadi kurva dispersi eksperimen rata-rata yang memiliki data kecepatan fase antara 20 hingga 50 titik frekuensi saja. Metode perata-rataan untuk menyederhanakan data kurva dispersi yang digunakan dapat merujuk kepada metode yang rekomendasikan oleh Rix (1987), Nazarian & Desai (1993), Joh (1996) dan Rosyidi (2004) untuk aplikasi seismik di struktur tanah dan perkerasan jalan. Algoritma yang digunakan dalam analisis SASW yang praktis digunakan adalah metode perata-rataan global (*global averaging method*) dengan penyesuaian persamaan kurva dispersi untuk nilai polinomial terbaik (*polynomial best-fit*).

Tahapan untuk proses rata-rata data kecepatan dalam kurva penyebaran dijelaskan sebagai berikut :

1. Kurva penyebaran dibagi menjadi bagian yang lebih kecil. Untuk memperoleh penyebaran data yang cukup pada panjang gelombang yang pendek maka nilai r (*constant increment ratio*) dapat digunakan. Nilai r dalam data yang diperoleh dinyatakan dalam (Gambar 6.7):

$$D_{i+1} = r \cdot d_i \tag{6.9}$$



Gambar 6.7 : Skematik kurva dispersi eksperimen purata global (Rosyidi, 2004)

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

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{i,a} + \lambda_{i,b}}{2} \tag{6.10}$$

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

$$d_i = \lambda_{i,b} - \lambda_{i,a} \quad (6.11)$$

dengan, panjang gelombang ke depan dan belakang ditentukan dari :

$$\lambda_{i,a} = \lambda_{\text{minimum}} + (\lambda_{\text{maksimum}} - \lambda_{\text{minimum}}) \cdot \frac{r^{i-1} - 1}{r^{n-1} - 1} \quad (6.12)$$

$$\lambda_{i,b} = \lambda_{\text{minimum}} + (\lambda_{\text{maksimum}} - \lambda_{\text{minimum}}) \cdot \frac{r^i - 1}{r^{n-1} - 1} \quad (6.13)$$

dengan $\lambda_{\text{maksimum}}$ dan λ_{minimum} diperoleh dari data kurva penyebaran pengujian untuk jarak sensor terpendek dan terpanjang.

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

$$|S_i| = \frac{\log \lambda_{\text{maksimum}} - \log \lambda_{\text{minimum}}}{k} \quad (6.14)$$

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

$$S_{i(\text{kiri})} = \lambda_i \cdot 10^{-|S_i|/2} \quad (6.15)$$

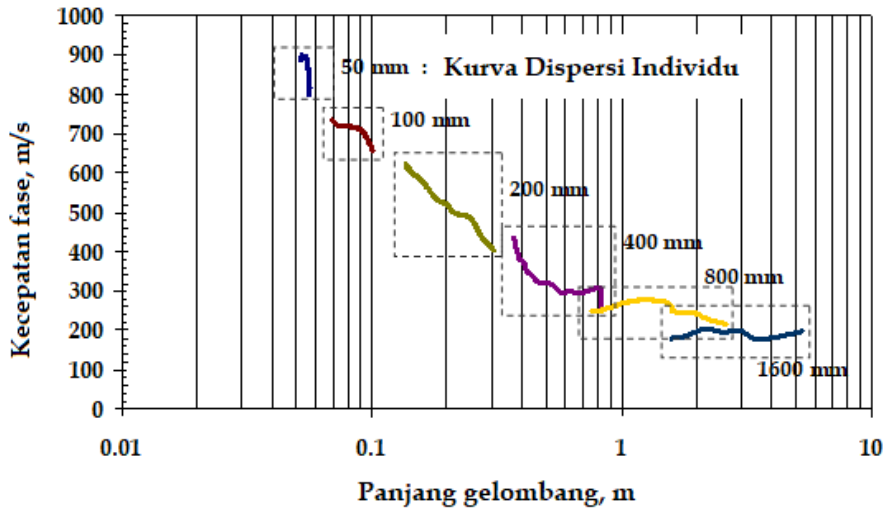
$$S_{i(\text{kanan})} = \lambda_i \cdot 10^{-|S_i|/2} \quad (6.16)$$

Kecepatan untuk λ_i yang terletak dalam interval:

$$S_{i(\text{kiri})} \leq \lambda < S_{i(\text{kanan})} \quad (6.17)$$

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

Kurva dispersi eksperimen kecepatan fase akhir merupakan gabungan dari beberapa kurva dispersi individu yang dihasilkan hasil setiap pengukuran jarak sensornya. Gambar 6.8 menunjukkan contoh kurva dispersi eksperimen dari gabungan beberapa kurva dispersi individu.



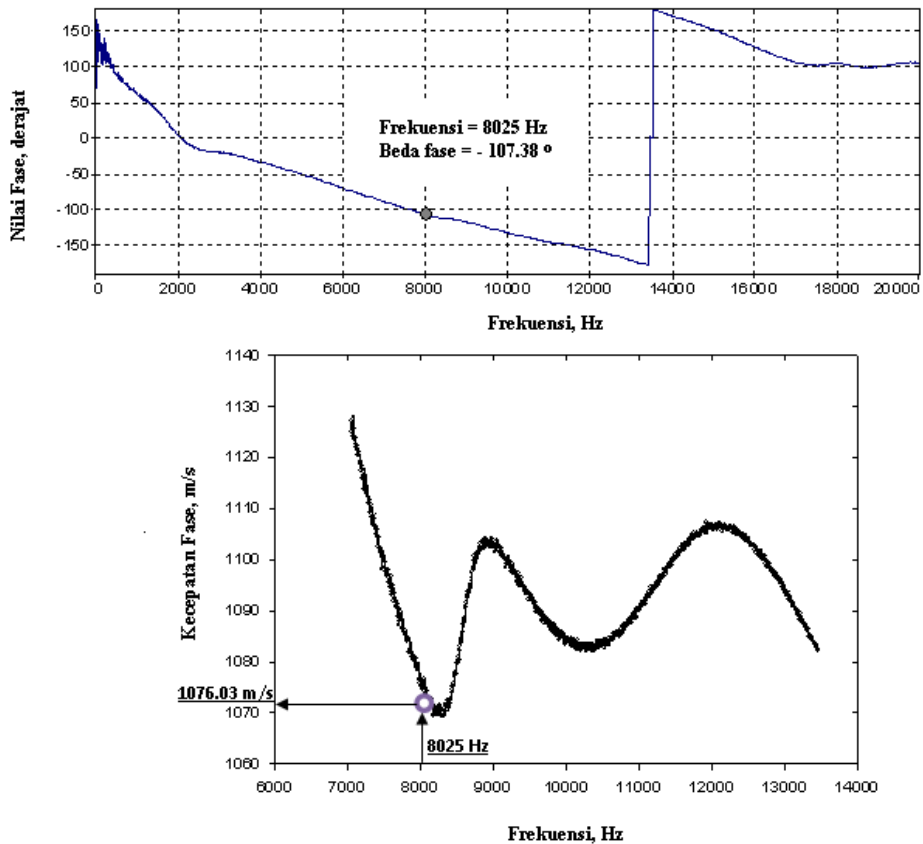
Gambar 6.8: Contoh kurva dispersi eksperimen komposit atau gabungan dari beberapa kurva dispersi individu setiap jarak sensor pada profil perkerasan jalan

6.6 CONTOH KASUS PEMBANGUNAN KURVA DISPERSI UNTUK PROFIL PERKERASAN JALAN

Contoh analisis kecepatan gelombang fase diberikan dalam Gambar 6.9 untuk spektrum fase hasil pengukuran 4 cm. Pengukuran SASW dilaksanakan pada perkerasan jalan lentur yang terletak di Jalan Provinsi Prambanan-Pakem dan Jalan Nasional Wonosari. Dari Gambar 6.9, ditunjukkan bahwa, salah satu titik data fase diperoleh untuk frekuensi 8025 Hz yaitu $107,38^\circ$.

Menggunakan metode beda fase, diperoleh nilai kecepatan fase gelombang yang merambat di antara dua sensor, yaitu sebesar 1076,03 m/s. Dengan cara yang sama, dilakukan perhitungan untuk titik-titik frekuensi lainnya dan demikian juga untuk jarak sensor 16, 32, 64, 100 dan 200 cm. Kumpulan data kecepatan fase gelombang melawan frekuensi sebagaimana diberikan dalam Gambar 6.10 yang menunjukkan corak sebaran kecepatan fase gelombang yang selanjutnya dikenali sebagai kurva sebaran eksperimen individu (*individual experimental dispersion curve*). Gabung dari

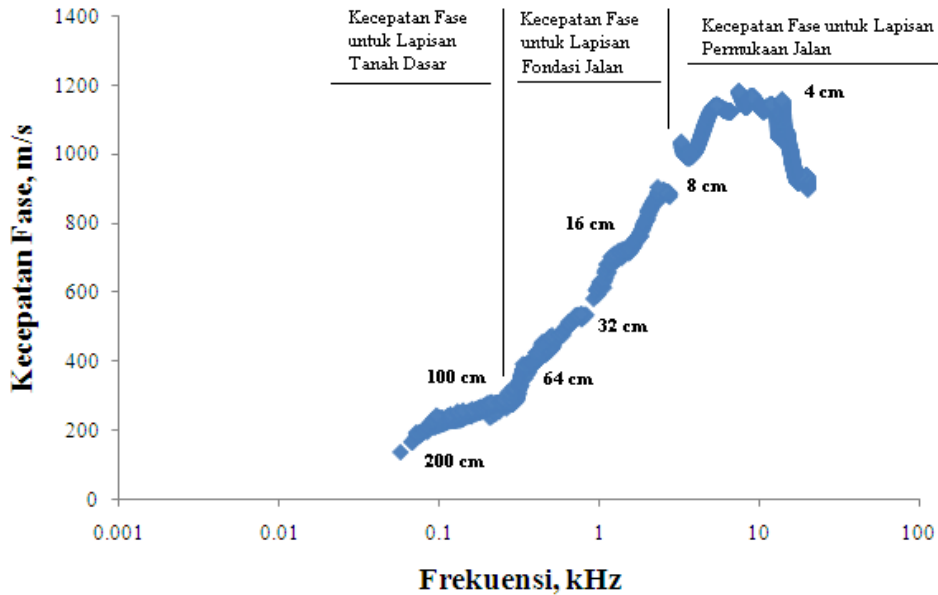
kurva-kurva individu disebut sebagai kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit (*composite experimental dispersion curve*).



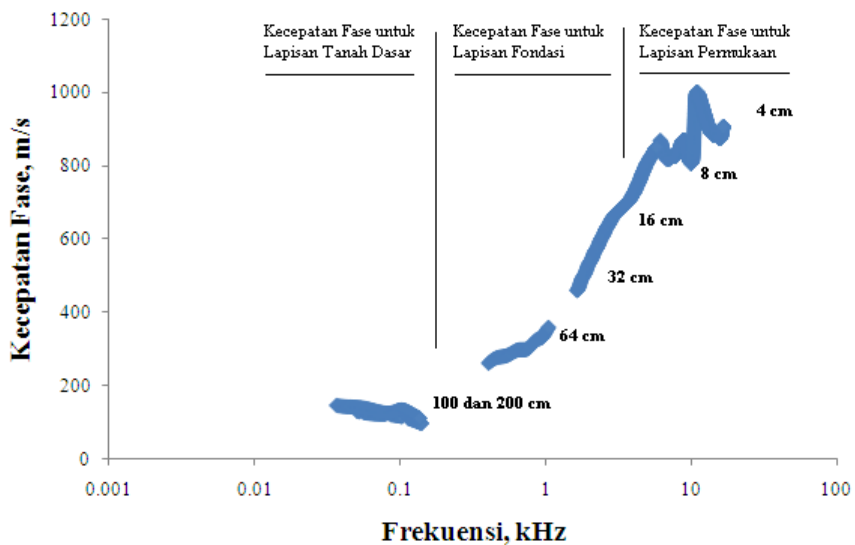
Gambar 6.9: Analisis kecepatan fase untuk jarak sensor 4 cm, studi kasus pada Jalan Nasional Wonosari

Seluruh konfigurasi dalam satu titik pengukuran tersebut digunakan untuk merangkai data penyebaran kecepatan fase (kelompok gelombang R) pada perkerasan jalan yang dimasukkan dapat mendeteksi lapisan perkerasan dari lapisan permukaan hingga ke tanah dasar (Gambar 6.10 untuk Jalan Nasional Wonosari/Piyungan-Ganding dan Gambar 6.11 untuk Jalan Provinsi Prambanan-Pakem). Data untuk lapisan permukaan diperoleh dari pengukuran pada jarak 4 hingga 8 cm, sedangkan untuk lapisan fondasi dari data pengukuran 8 hingga 32 cm, dan lapisan tanah dasar menggunakan data dari pengukuran 64 hingga 200 cm. Dari Gambar 6.10 terlihat bahwa lapisan permukaan aspal memiliki nilai kecepatan fase yang tinggi (1000 – 1200 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 – 800 m/s dan lapisan tanah dasar pada 180 – 280 m/s.

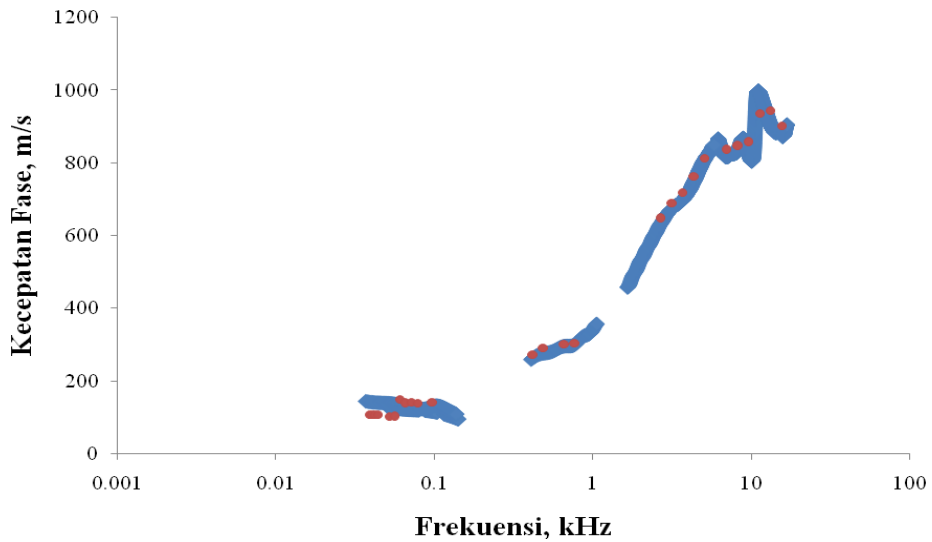


Gambar 6.10: Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk Jalan Wonosari



Gambar 6.11: Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk Jalan Prambanan

Gambar 6.12 menunjukkan hasil analisis perata-rataan global untuk memilih segmen data kurva menjadi 40 hingga 50 data. Data rata-rata global dari kurva penyebaran fase ini selanjutnya dapat dianalisis untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser dan kedalaman dalam analisis inversi yang penjelasan lengkapnya diberikan pada Bab 7 berikut ini.



Gambar 6.12: Contoh analisis rerata global kurva sebaran eksperimen untuk Jalan Prambanan

7

ANALISIS INVERSI DAN PROFIL KEKAKUAN BAHAN

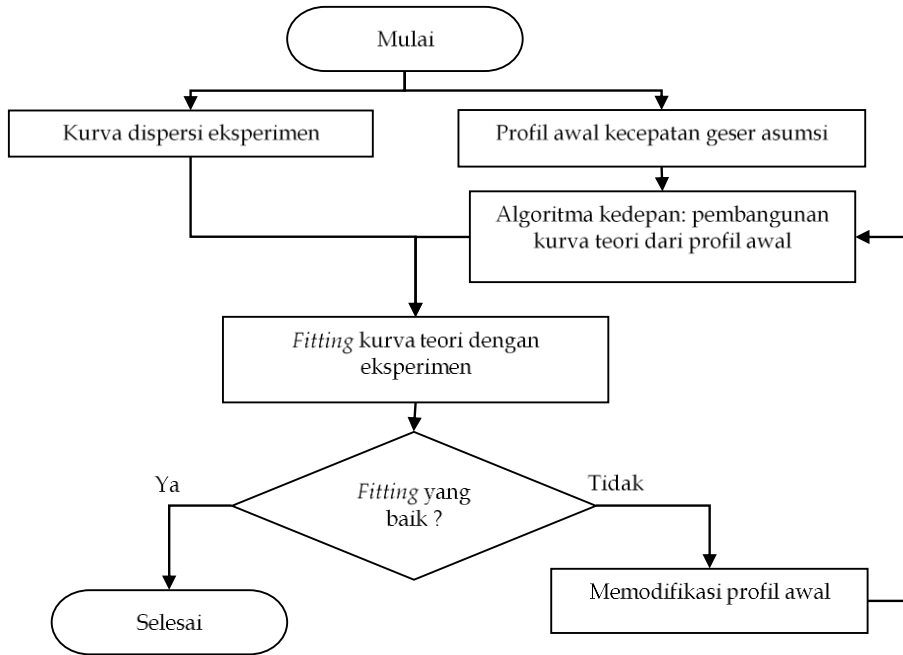
7.1 PENGANTAR

7.1.1 Prosedur Umum Analisis Inversi SASW

Analisis inversi dilakukan untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman (per lapisan) yang diperoleh dari data kurva dispersi eksperimen. Proses inversi dimulai dengan melakukan asumsi terhadap beberapa parameter profil perkerasan. Kurva dispersi kecepatan fase teori selanjutnya dihitung berdasarkan model profil perkerasan ini. Kurva dispersi teori kemudiannya dibandingkan dengan kurva eksperimen. Apabila kurva teori belum berpadanan dengan kurva eksperimen, maka perhitungan diulang kembali dengan mengubah parameter model dalam proses iterasi.

Proses iterasi ini terus dilakukan sehingga terdapat kesamaan dan kesesuaian (*fitting*) antara kurva dispersi teori dengan kurva dispersi eksperimen yang ditunjukkan dengan nilai simpangan yang minimal. Akhirnya, profil kecepatan geser suatu media dapat diperoleh dari kurva teori akhir ini. Gambar 7.1 menunjukkan bagan alir secara umum prosedur inversi dalam analisis SASW.

Terdapat beberapa metode inversi dapat digunakan dalam teknik SASW untuk. Metode-metode tersebut menggunakan perhitungan kurva teori dan membuat padanan (optimasi) dengan kurva eksperimen dengan algoritma yang berbeda-beda. Terdapat dua aspek yang digunakan untuk menilai ketepatan metode inversi yang sesuai untuk lokasi pengujian, yaitu algoritma kedepan (*forward algorithm*) dan metode yang digunakan untuk memodifikasi profil awal (*optimasi-inversi*). Diskusi yang lebih detail mengenai perbandingan beberapa teknik inversi dalam metode SASW ini dapat dibaca lebih lanjut pada studi Orozco (2003).

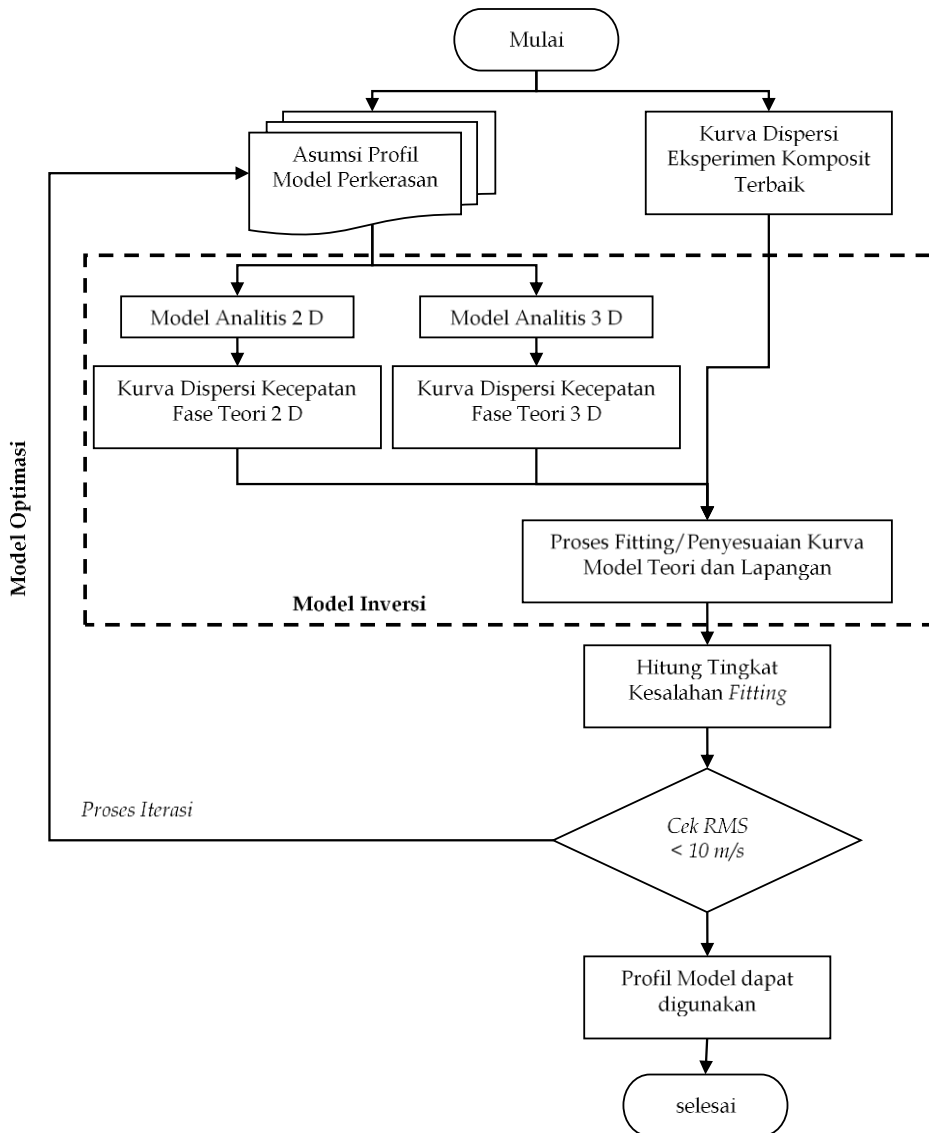


Gambar 7.1: Bagan alir dalam prosedur inversi SASW

7.1.2 Kurva Dispersi Teori 2 D dan 3 D Matriks Kekakuan Dinamik

Dalam teknik yang diperkenalkan oleh penulis dalam buku ini, untuk membangun kurva dispersi teori dalam proses inversi pada kurva dispersi eksperimen, digunakan algoritma model perambatan gelombang 2 D dan 3 D. Melalui persamaan diskrit 2 D dan 3 D dapat diperoleh kurva simpangan gelombang dalam fungsi nyata dan imajiner berdomain spasial. Berbasis nilai simpangan yang diperoleh, dapat dihasilkan kurva spektrum fase yang selanjutnya digunakan untuk menghasilkan suatu kurva dispersi teori. Dasar-dasar teori perambatan gelombang dan persamaan-persamaan dasar dapat dilihat pada penjelasan di Bab 2.

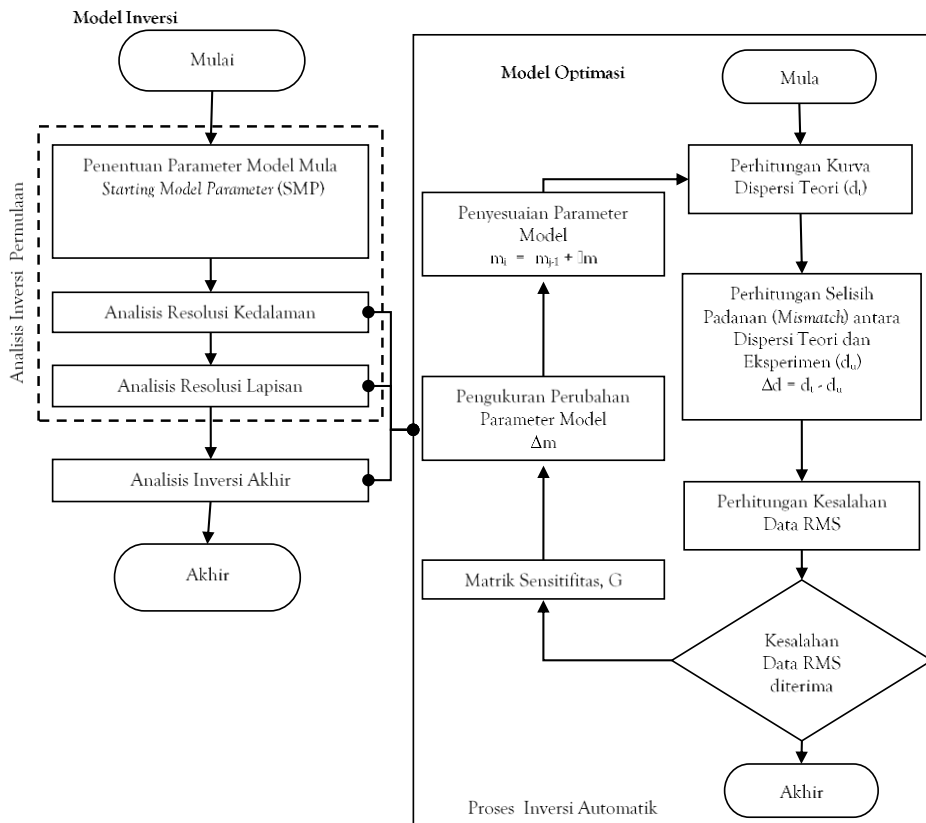
Aplikasi model 2 D dan 3 D dalam proses inversi dijelaskan dalam Gambar 7.2. Kedua analisis inversi model perambatan gelombang 2 D dan 3 D dipilih berdasarkan kompleksitas profil perkerasan jalan yang diukur. Tidak ada kriteria yang pasti, dalam kondisi apakah analisis 2 D maupun 3 D perambatan gelombang digunakan dalam inversi, namun secara praktis, validasi kedua analisis dapat dilihat dari resolusi inversi yang diperoleh. Pada bagian akhir pembahasan teori dan prosedur inversi diberikan contoh simulasi perbandingan analisis 2 D dan 3 D yang digunakan dalam proses inversi untuk profil perkerasan jalan.



Gambar 7.2: Skema proses inversi kurva dispersi kecepatan fase

7.2 PROSEDUR ANALISIS INVERSI

Penjelasan mekanisme inversi dalam dapat diuraikan sebagai berikut ini dan proses inversi dijelaskan dalam beberapa tahapan analisis pada bagan alir di Gambar 7.3.



Gambar 7.3: Bagan alir proses analisis dalam inversi dan optimasi kurva dispersi kecepatan fase

7.2.1 Parameter Model Permulaan (Starting Model Parameter, SMP)

Parameter model permulaan (*starting model parameter*, SMP) digunakan untuk mempermudah proses inversi yang dilakukan. Tahapan ini merupakan tahapan pertama yang harus dijalankan untuk menyediakan informasi awal bagi analisis inversi. Beberapa variabel dalam SMP yang sangat berpengaruh dalam pembangunan kurva dispersi teori diantaranya parameter kecepatan fase (V_{PH}) dan ketebalan lapisan (H) sedangkan parameter rasio *Poisson* bahan, berat volume bahan, faktor redaman (D) dapat diasumsikan sesuai kondisi bahan.

Proses pertama yang perlu dilakukan untuk membangun parameter model permulaan adalah pengukuran profil kecepatan geser gelombang permulaan (*preliminary shear wave velocity*).

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

- a. Pengukuran jumlah lapisan (N_p) profil fase pertama yang berreferensi kepada jumlah lapisan pada data kurva dispersi perata-rataan global yang dinyatakan sebagai:

$$N_p = N_d + 1 \quad (7.1)$$

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

$$H_{p,i} = \alpha (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (7.2)$$

α diberikan nilai antara 0,3 hingga 0,8

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

Profil fase kedua adalah sebuah profil yang dibangun secara langsung daripada analisis inversi dan diasumsikan secara terpisah dari profil pertama. Profil fase yang pertama tidak sesuai digunakan untuk proses inversi karena terdapat banyak lapisan. Dengan demikian, profil fase kedua merujuk pada informasi lapangan kondisi media (profil sub-permukaan) yang sebenarnya. Kecepatan geser gelombang profil fase kedua dimodelkan dari informasi profil fase pertama menggunakan metode rata-rata pemberat (*weighting average*). Metode rata-rata didasarkan pada kelambatan (*slowness*) yang resiprokal dengan kecepatan. Jumlah waktu perjalanan (T) dari kecepatan gelombang geser yang melalui dua lapisan dengan ketebalan H_1 dan H_2 dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$T = \frac{H_1}{V_{s,1}} + \frac{H_2}{V_{s,2}} \quad (7.3)$$

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

$$V_{s,\text{purata}} = \frac{H_1 + H_2}{\frac{H_1}{V_{s,1}} + \frac{H_2}{V_{s,2}}} \quad (7.4)$$

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

Salah satu model pengukur kesalahan adalah kesalahan RMS (*root-mean-square error*). Profil akhir dipilih setelah dihitung dengan variasi nilai perbandingan kedalaman dengan panjang gelombang (α). Profil permulaan yang digunakan dalam analisis dipilih dengan nilai α yang menghasilkan kesalahan RMS terkecil.

Penentu kesalahan RMS dihitung melalui persamaan:

$$\text{Kesalahan RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|^2} \quad (7.5)$$

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

7.2.2 Perhitungan Matrik Sensitifitas (G) dan Analisis Matrik Kovarian (C)

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

1) Matrik Sensitivitas

Matrik ini dibangun dari differensiasi fungsi korelasi fisik (*physical correlation*) yang dinilai berdasarkan setiap data yang berhubungan dengan parameter modelnya. Pembangunan matrik sensitifitas dalam analisis inversi berkaitan dengan penyusunan sensitifitas persamaan ke depan (*forward equation*) dalam menentukan nilai parameter-parameter model permulaan. Penurunan persamaan matrik dalam analisis ke depan dijelaskan secara terperinci dalam Menke (1984) dan Joh (1996). Pendeknya, penurunan matrik parsial untuk analisis inversi global dapat ditulis sebagai:

$$G = \frac{\partial V_{ph}}{\partial V_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,i}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,1}}{\partial V_{s,m}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_{ph,j}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,j}}{\partial V_{s,i}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,j}}{\partial V_{s,m}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,1}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,i}} & \dots & \frac{\partial V_{ph,n}}{\partial V_{s,m}} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

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

$$G = \begin{pmatrix} \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{5cm} & \vdots \\ G_{p1} & \dots & G_{pm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data p dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 5 cm} \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{10cm} & \vdots \\ G_{q1} & \dots & G_{qm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data q dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 10 cm} \end{matrix} \\ \begin{matrix} G_{11} & \dots & G_{1m} \\ \vdots & [G]_{20cm} & \vdots \\ G_{r1} & \dots & G_{rm} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Data r dalam kurva disperse} \\ \text{rata-rata mewakili jarak 20 cm} \end{matrix} \end{pmatrix} \quad (7.7)$$

dengan, $G_{ij} = \frac{\partial V_{ph,j}}{\partial V_{s,i}}$ adalah turunan parsial kecepatan fase ke j terhadap kecepatan gelombang geser lapisan ke i , dan $[G]_{5cm}$, $[G]_{10cm}$, $[G]_{20cm}$ merupakan bentuk matrik

turunan data kurva dipersi rata-rata, misalnya dalam kasus ini adaah untuk jarak sensor 5, 10 dan 20 cm. Susunan matrik G ini dibangun berdasarkan jumlah konfigurasi jarak pengukuran yang digunakan dalam pengujian SASW.

2) Matrik Kovarian

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

$$C_{D,ij} = \begin{cases} \rho \sigma_{D,i} \sigma_{D,j} & (i \neq j) \\ \sigma_{D,i}^2 & (i = j) \end{cases} \quad (7.8)$$

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

$$C_{M,ij} = \begin{cases} \rho \sigma_{M,i} \sigma_{M,j} & (i \neq j) \\ \sigma_{M,i}^2 & (i = j) \end{cases} \quad (7.9)$$

Penentuan simpangan baku pada matrik data ini dapat dilakukan menggunakan nilai perbandingan ketidakpastian (*uncertainty ratio*), yang dinyatakan sebagai $\frac{\sigma_M}{\sigma_D}$, yang menunjukkan nilai ketidakpastian relatif parameter model terhadap data eksperimen. Nilai perbandingan ketidakpastian yang digunakan untuk menguji ketepatan model kemiripan maksimum (*maximum likelihood*) mempunyai nilai 1, 10, 100 dan $\frac{0.1V_s}{0.01V_{ph}}$.

Dalam proses iterasi seterusnya, penyesuaian model ($m_j = m_{j-1} + \Delta m$) dijalankan untuk mendapatkan parameter model yang hampir sama (mendekati) dengan profil sebenarnya. Persamaan umum matrik kepekaan dan kovarian dapat dituliskan sebagai hubungan :

$$m_{n+1} = m_n - (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} (G^T C_D^{-1} \Delta d + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (7.10)$$

$$\Delta m = (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} (G^T C_D^{-1} \Delta d + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (7.11)$$

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

7.2.3 Pembangunan Analisis Resolusi (Resolution Analysis)

Analisis resolusi yang digunakan dalam proses inversi SASW sebagai analisis solusi kedalaman dan analisis sensitifitas lapisan. Konsep dasar penurunan persamaan yang digunakan dalam model ini merujuk pada Menke (1984), Joh (1996) dan Rosyidi (2004, 2013).

Analisis resolusi kedalaman merupakan suatu prosedur untuk mengukur kedalaman yang teresolusi secara maksimum pada suatu profil perkerasan jalan berdasarkan data kurva dispersi eksperimen. Resolusi kedalaman berkaitan dengan kemampuan penetrasi gelombang R pada media. Kedalaman penetrasi ditentukan oleh frekuensi yang dibangkitkan dari suatu sumber gelombang di permukaan media dan nilai kekakuan bahan.

Selanjutnya, analisis sensitifitas lapisan dalam penelitian ini digunakan untuk fungsi sebagai pengukur kesesuaian lapisan yang diasumsikan dalam profil permulaan (SMP). Analisis ini dilakukan setelah analisa resolusi kedalaman terhadap suatu profil permulaan dalam inversi telah dijalankan/selesai. Matrik resolusi parameter model ini digunakan untuk menilai sejauh mana sensitifitas lapisan terhadap data eksperimen. Kriteria analisis sensitifitas lapisan yang digunakan adalah merujuk kepada nilai sensitifitas lapisan setengah ruang dimana lapisan-lapisan pada profil dapat diterima jika nilai sensitifitasnya lebih besar daripada lapisan setengah ruangnya. Apabila terdapat lapisan yang memiliki nilai matrik kepekaan di bawah kriteria ini (0,01), maka dilakukan analisis inversi awal dengan meningkatkan nilai kedalaman lapisan.

7.3 MODULUS ELASTISITAS BAHAN

Setelah proses inversi diselesaikan, akan diperoleh profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman (lapisan-lapisan perkerasan jalan). Selanjutnya, berdasarkan teori teknik perambatan gelombang, modulus geser (*shear modulus*) pada tingkat regangan di bawah 0,0003 % dapat ditentukan dari kecepatan perambatan gelombang geser sebagai berikut:

$$G = \rho V_s^2 \quad (7.12)$$

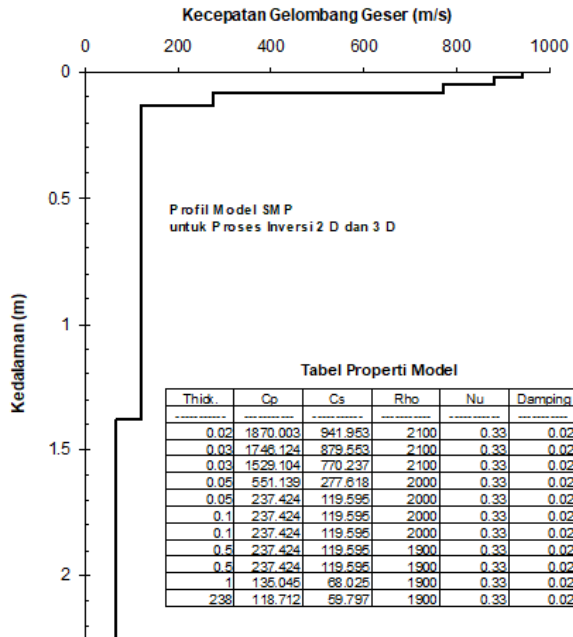
disini, ρ adalah berat jenis, diperoleh dari pada $\frac{\gamma_t}{g}$, dimana γ_t adalah berat unit bahan

dan g merupakan nilai gravitasi. Modulus elastik bahan juga dapat dihitung menggunakan nilai kecepatan gelombang apabila rasio Poisson (ν) bahan yang diketahui atau dapat diasumsikan berdasarkan bahan lapisan perkerasan. Berdasarkan teori elastik, modulus elastik (E) dapat ditentukan sebagai :

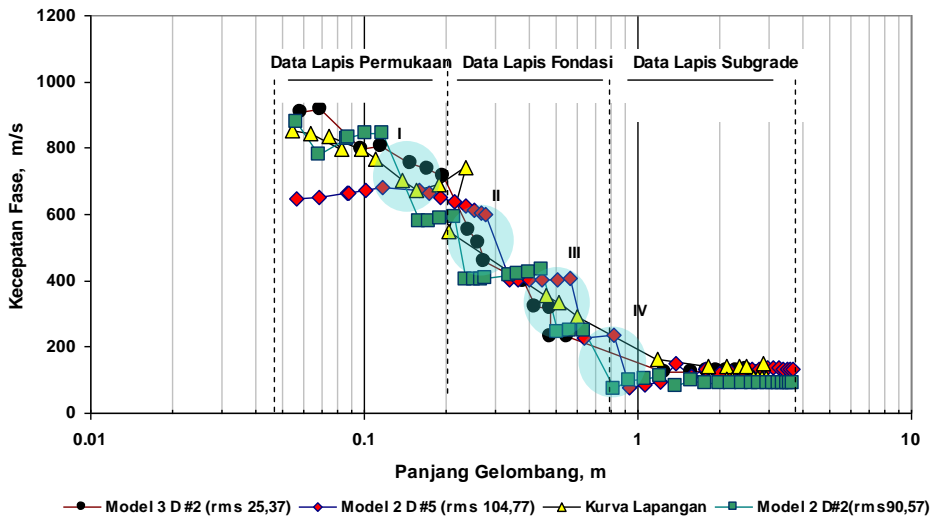
$$E = 2 G (1 + \nu) = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (7.13)$$

7.4 STUDI KASUS: INVERSI DENGAN MODEL 2 D DAN 3 D UNTUK PROFIL PERKERASAN JALAN

Data lapangan seismik telah diperoleh dari pengukuran SASW pada beberapa lokasi di Jalan Propinsi Prambanan - Pakem, DI. Yogyakarta. Pada bagian ini, satu studi kasus dilakukan dengan melibatkan model 2 D dan 3 D perambatan gelombang dalam proses inversi. Gambar 7.4 menunjukkan contoh pembangunan parameter model SMP. SMP terdiri dari multi-lapisan yang mewakili susunan profil perkerasan jalan dari lapisan permukaan aspal hingga lapisan tanah dasar. Profil 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. Sifat bahan setiap lapisan perkerasan (ketebalan, kecepatan gelombang geser dan gelombang tubuh P, rasio Poisson, berat volume bahan dan rasio damping) yang digunakan dalam profil SMP turut dijelaskan secara rinci dalam Gambar 7.4. Hasil simulasi model 2 D dan 3 D kurva dispersi teori diberikan dalam Gambar 7.5.



Gambar 7.4: Profil Model SMP untuk Analisis Model 2 D dan 3 D



Gambar 7.5: Kurva dispersi hasil simulasi model 2 D dan 3 D terhadap kurva dispersi eksperimen Jalan Prambanan – Pakem

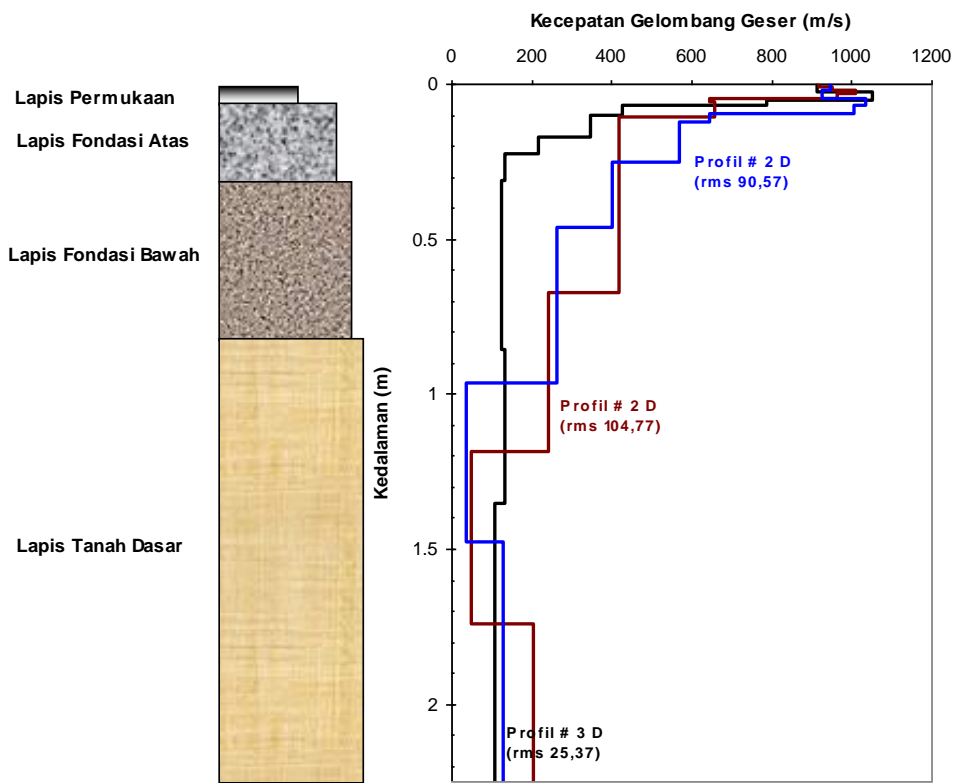
Dari Gambar 7.5 dapat ditunjukkan bahwa kurva teori 2 D yang dihasilkan terdapat deviasi besar terhadap kurva eksperimen terutama pada sampling untuk lapisan

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 pengelompokkan 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. Di sisi lain, model 2 D ditunjukkan mendekati (berpadanan) kurva eksperimen dengan kesesuaian yang baik pada lapisan subgrade perkerasan jalan dengan nilai panjang gelombang lebih dari 2 m.

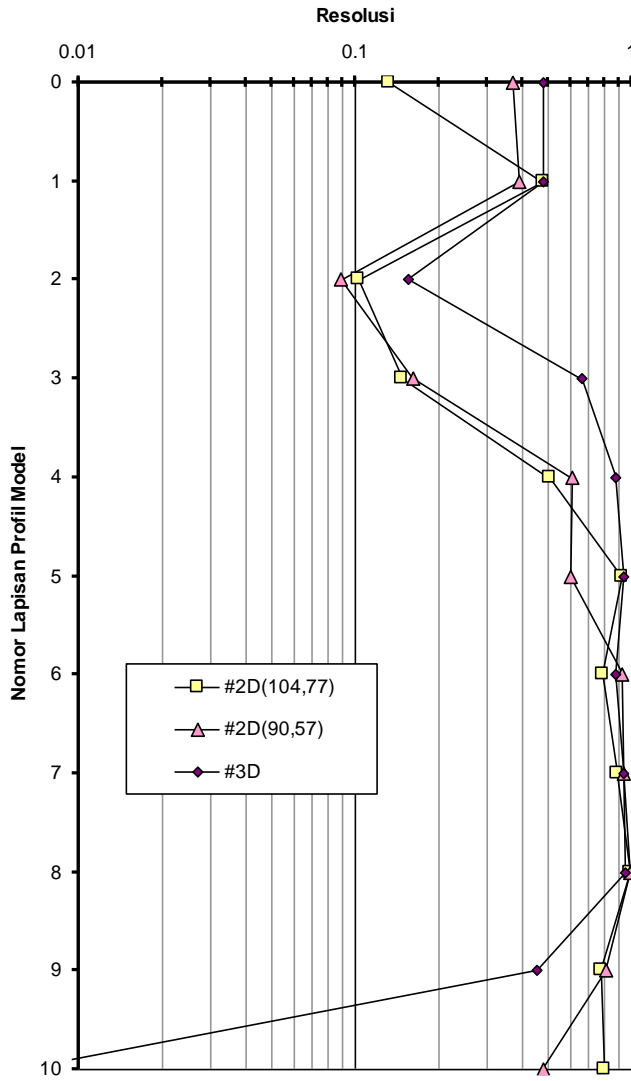
Proses penyelesaian dalam inversi menggunakan model perambatan gelombang 3 D terhadap kurva eksperimen menghasilkan kurva teori dengan nilai ralat RMS sebesar 25,37 m/s dengan proses iterasi sebanyak 2 kali (Gambar 5.29). Secara umum, kurva model 3 D mampu membentuk trend kurva yang sesuai dengan kurva 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 inversi dari simulasi 2 D dan 3 D diberikan pada Gambar 7.6.

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.

Analisis resolusi lapisan dilakukan terhadap profil model 2 D dan 3 D. Gambar 7.7 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 7.6: Perbandingan profil model 2 D dan 3 D di Jalan Prambanan - Pakem



Gambar 7.7: Hasil analisis resolusi lapisan profil model 2 D dan 3 D di Jalan Prambanan - Pakem

8

SIMULASI PERAMBATAN GELOMBANG 2 D DAN 3 D DALAM ANALISIS INVERSI

8.1 PENGANTAR

Dalam bab ini, diuraikan penjelasan perbandingan analisis inversi menggunakan model perambatan gelombang 2 D dan 3 D. Perbandingan ini digunakan untuk memilih penggunaan model perambatan gelombang yang tepat pada teknik SASW yang diaplikasikan dalam profil perkerasan.

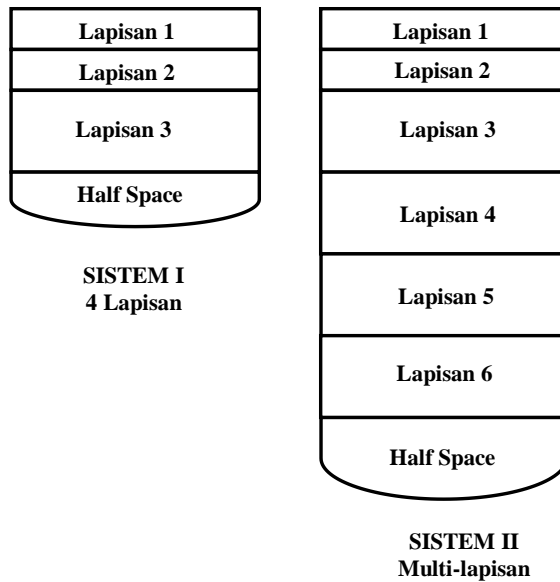
Simulasi dilakukan dengan menggunakan profil model perkerasan buatan (artificial) dengan kategori model regular dan irregular. Selanjutnya menggunakan profil model dibangun model parameter awal dan simulasi perambatan gelombang 2 D dan 3 D untuk menghasilkan kurva disperse teori. Dari hasil perbandingan kedua kurva dispersi teori dapat disimpulkan keunggulan dan kelemahan antara kedua model 2 D dan 3 D yang diterapkan dalam analisis inversi SASW untuk profil perkerasan jalan.

8.2 SIMULASI MODEL 2 D DAN 3 D PADA STRUKTUR PERKERASAN JALAN

8.2.1 Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Heterogen

Pada bagian ini, simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan pada model buatan (simulasi) atau disebut sebagai model artificial yang memiliki karakteristik lapisan heterogen tidak ekstrem atau memiliki sifat kekakuan bahan yang hampir sama (reguler dan teratur). Sistem pertama merupakan balok beton yang tersusun dalam tiga lapisan beton (Gambar 8.1) dengan karakteristik dinamik sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 8.1. Untuk sistem kedua disusun profil balok beton dengan sistem 5 lapisan, sedangkan sistem ketiga disusun dalam profil 6 lapisan (Gambar 8.1). Karakteristik dinamik untuk sistem kedua dan ketiga selengkapnya dijelaskan dalam Tabel 8.2 dan Tabel 8.3. Ketiga sistem tersebut diletakkan di atas lapisan tak terhingga (*half space*) sebagai syarat algoritma matrik 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 8.1: Sistem Profil Model Awal untuk Proses Simulasi 2 D dan 3 D pada Profil Artifisial Reguler dan Homogen

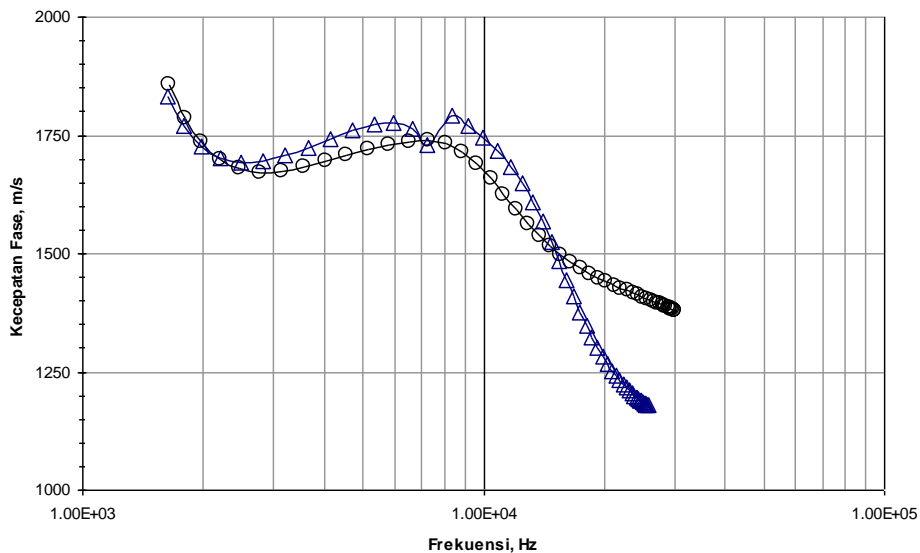
Tabel 8.1: Karakteristik lapisan pada sistem 1

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 8.2: 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

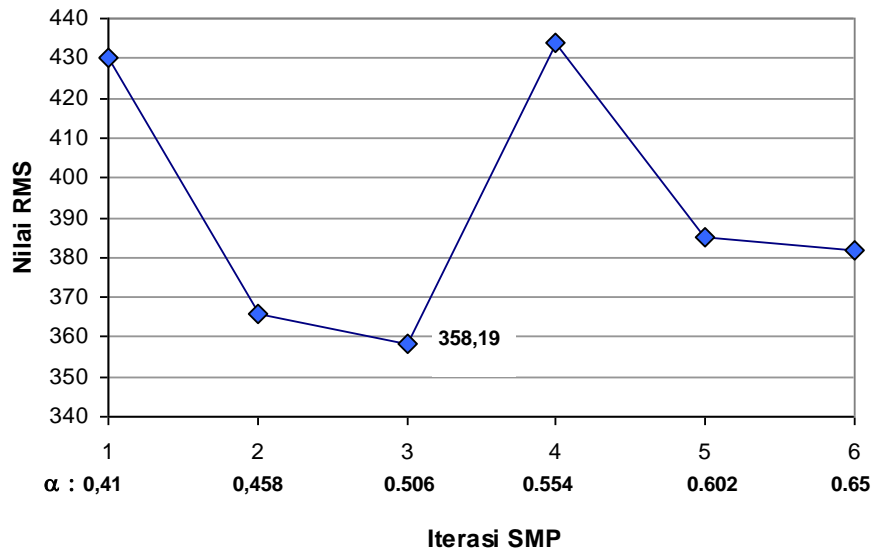
Untuk menguji resolusi dan ketepatan hasil simulasi model, dalam studi ini digunakan data eksperimen dari Rosyidi dkk. (2005) sebagai data dummy perambatan gelombang seismik (Gambar 8.3). Data dummy yang digunakan berupa kurva eksperimen tersebut menggambarkan hubungan antara kecepatan fase terhadap nilai frekuensinya. Nilai kecepatan fase yang ditunjukkan mengindikasikan nilai kecepatan fase yang hampir seragam yang dimisalkan sebagai profil perkerasan jalan yang cenderung homogen.



Gambar 8.2: Kurva eksperimen kecepatan fase dari Rosyidi dkk. (2005)

1) Hasil Simulasi Model 2 D

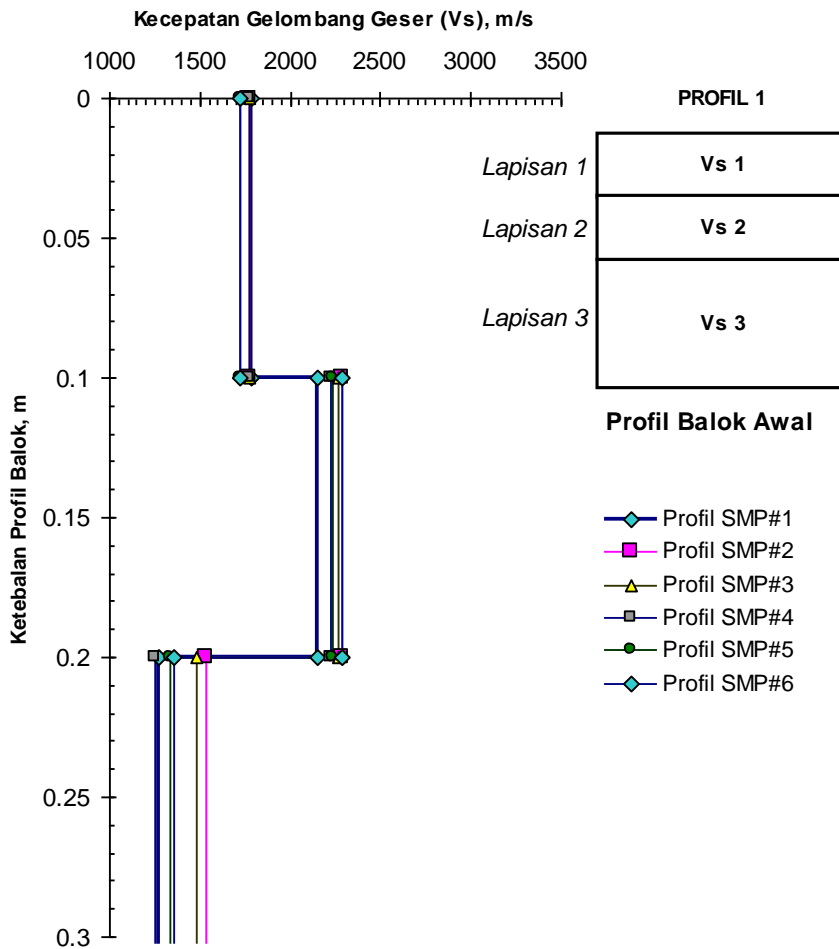
Berdasarkan profil model 1 yang terdiri dari profil 3 lapisan, dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai parameter model awal (SMP) yang memiliki rasio λ (panjang gelombang) terhadap H (tebal seluruh lapisan profil) yang optimum. Nilai rasio ditetapkan antara nilai 0,41 hingga nilai 0,65 dengan 6 iterasi profil SMP. Penetapan rasio $\lambda - H$ ini berdasarkan wilayah optimasi yang telah direkomendasikan oleh Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Gambar 8.3 menunjukkan nilai RMS dari hasil analisis SMP dengan berbagai variasi nilai rasio $\lambda - H$. Nilai RMS terkecil (358,19 m/s) terletak pada iterasi model dengan rasio $\lambda - H$ pada 0,554.



Gambar 8.3: Grafik nilai RMS pada profil SMP untuk variasi rasio $\lambda - H$

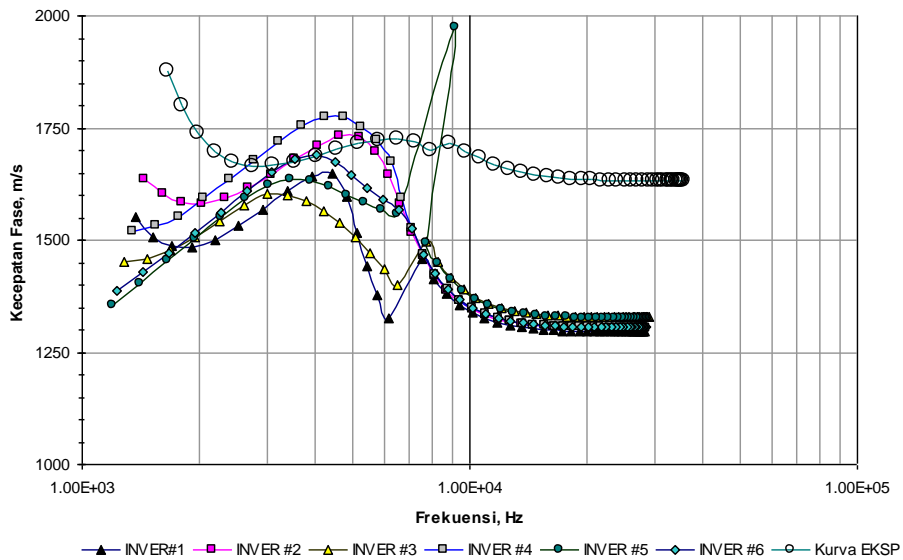
Profil SMP untuk seluruh nilai rasio $\lambda - H$ diberikan dalam Gambar 8.4. Dari profil SMP pertama hingga keenam, secara umum, memiliki trend profil yang hampir sama terutama pada lapisan pertama profil model. Untuk lapisan ketiga profil model terlihat sangat bervariasi antara kecepatan gelombang 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 8.5 dan Gambar 8.6 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 menjalankan algoritma kemiripan maksimum menggunakan software Matlab dan WinSASW versi 2.0.1 sebagaimana telah diuji keandalannya dalam proses inversi SASW otomatis oleh Joh (1996) dan Rosyidi (2004).

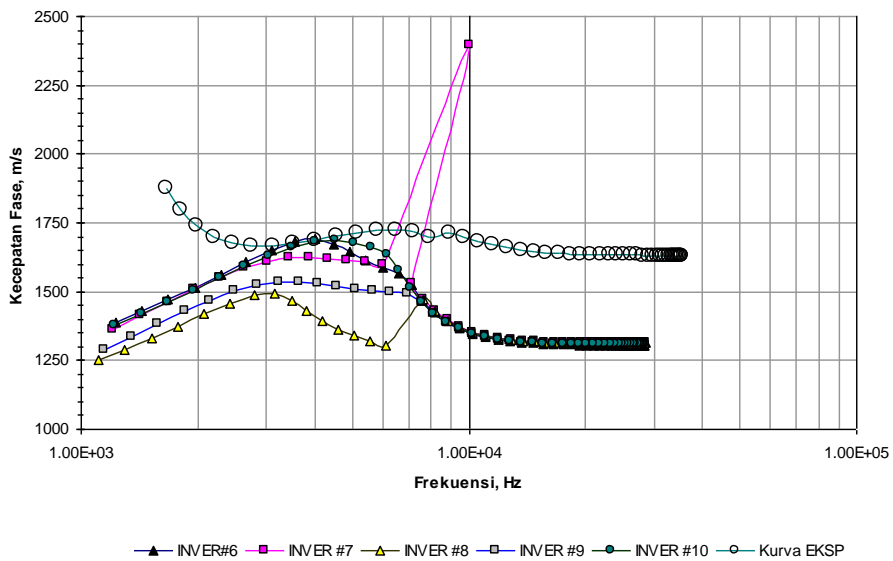


Gambar 8.4: Profil SMP Analisis 2 D untuk variasi rasio $\lambda - H$ pada model 1

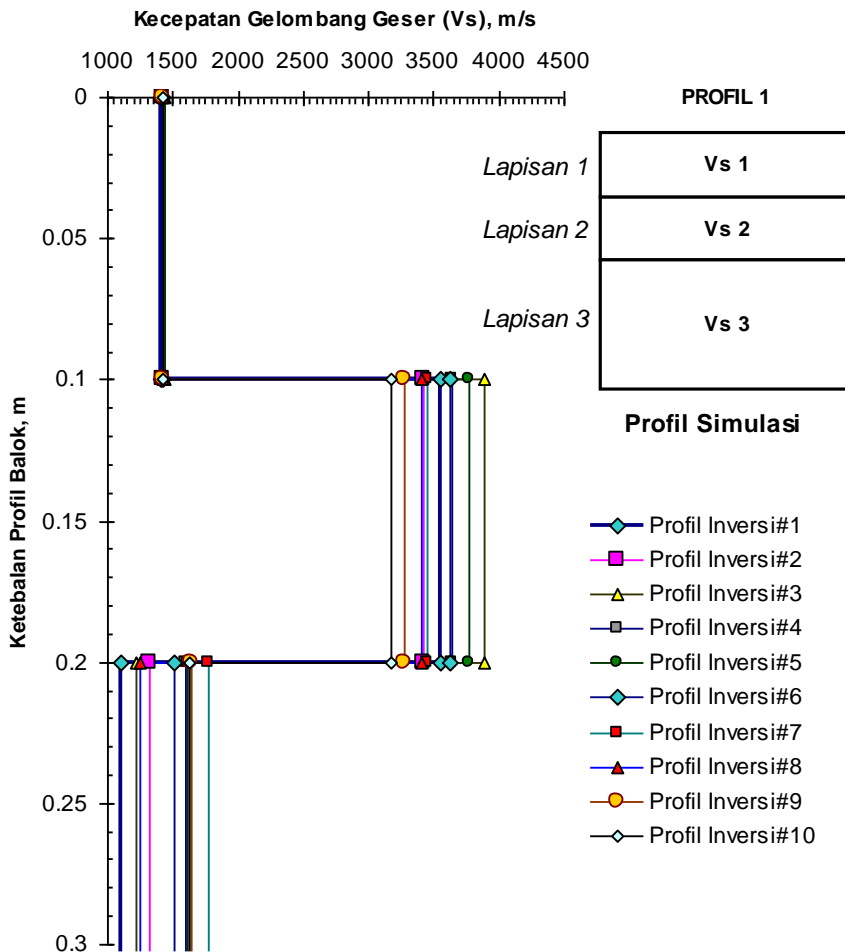
Hasil simulasi 2 D menunjukkan bahwa kesepuluh iterasi kurva teoritik yang dilakukan tidak dapat mendekati kurva eksperimen dengan baik. Dengan perbedaan minimum yang dapat dicapai antara kurva eksperimen dan kurva teori hasil simulasi dalam nilai RMS mencapai sebesar 204,71 m/s oleh profil iterasi ke-10. Dari Gambar 8.6 terlihat bahwa kurva teoritik hasil simulasi 2 D ke-10 hanya dapat sesuai (*matched*) pada nilai frekuensi antara 3000 hingga 5000 Hz dengan nilai kecepatan fase gelombang pada 1650 hingga 1700 m/s.



Gambar 8.5: Kurva dispersi profil SMP 1 hingga SMP 6 analisis 2 D untuk model 1



Gambar 8.6: Kurva dispersi profil SMP 6 hingga SMP 10 untuk analisis 2 D model 1

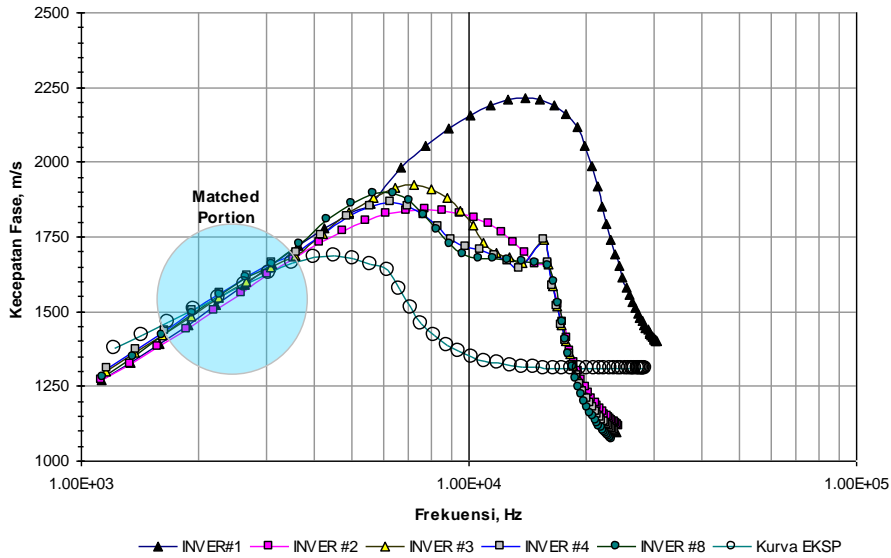


Gambar 8.7: Profil simulasi analisis 2 D untuk sistem 1 dengan parameter inversi V_s

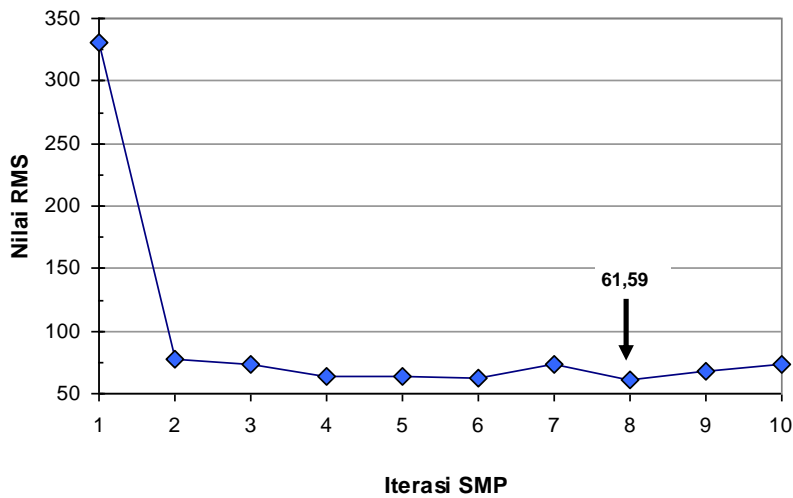
Hasil profil untuk simulasi 2 D diberikan dalam Gambar 8.7. Sebagaimana profil SMP, kesepuluh profil akhir hasil simulasi menunjukkan padanan untuk lapisan pertama profil sedangkan lapisan kedua dan ketiga sangat bervariasi. Meskipun demikian, berdasarkan perbedaan nilai RMS yang besar antara kurva teori 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 8.8 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 8.9) yang terletak pada iterasi model ke-8.



Gambar 8.8: Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 1 dengan parameter inversi V_S



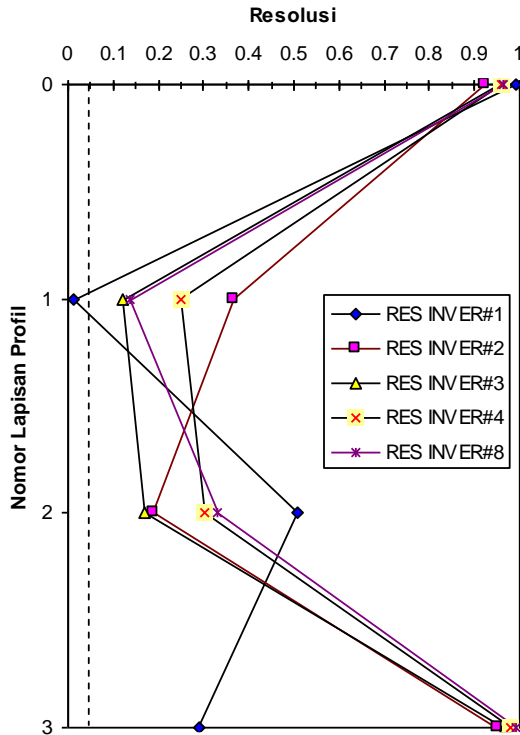
Gambar 8.9: Nilai RMS untuk profil hasil simulasi sistem 1 dengan parameter inversi V_S dan H

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 8.8. Hal ini menunjukkan

padanan pada profil hanya sesuai wilayah lapisan terbawah 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 8.9, 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 8.10 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).

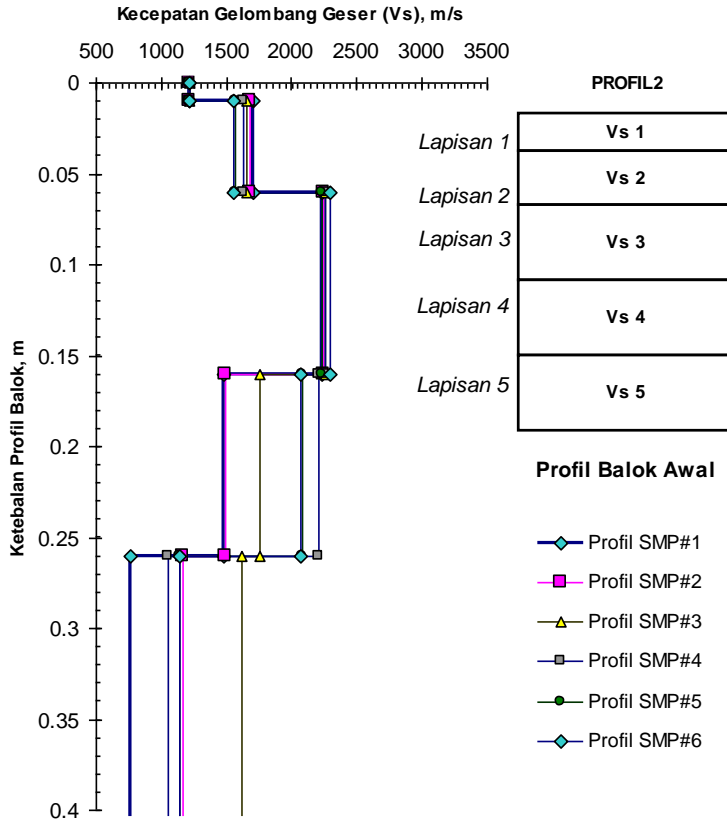
Kriteria analisis kepekaan lapisan yang digunakan merujuk kepada nilai sensitivitas lapisan tak terhingga dimana lapisan-lapisan pada profil dapat diterima jika nilai sensitivitasnya lebih besar daripada lapisan tak terhingganya. Dalam Gambar 8.10 menunjukkan bahwa hasil analisis resolusi lapisan pada 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.



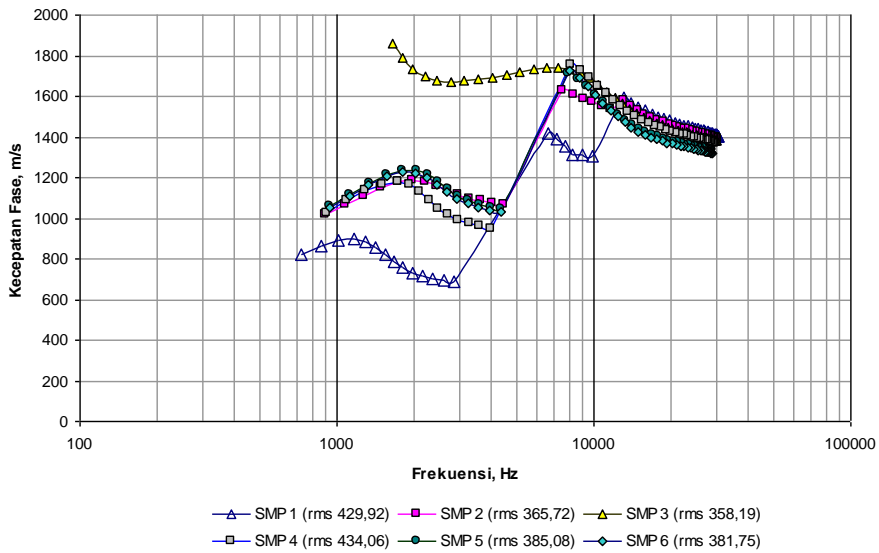
Gambar 8.10: Hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi analisis 2 D model 1

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 8.11 dan Gambar 8.12 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 $\lambda - H$ 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 8.12). Dari Gambar 8.12 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 dalam profil ke-3 adalah nilai rasio optimum.

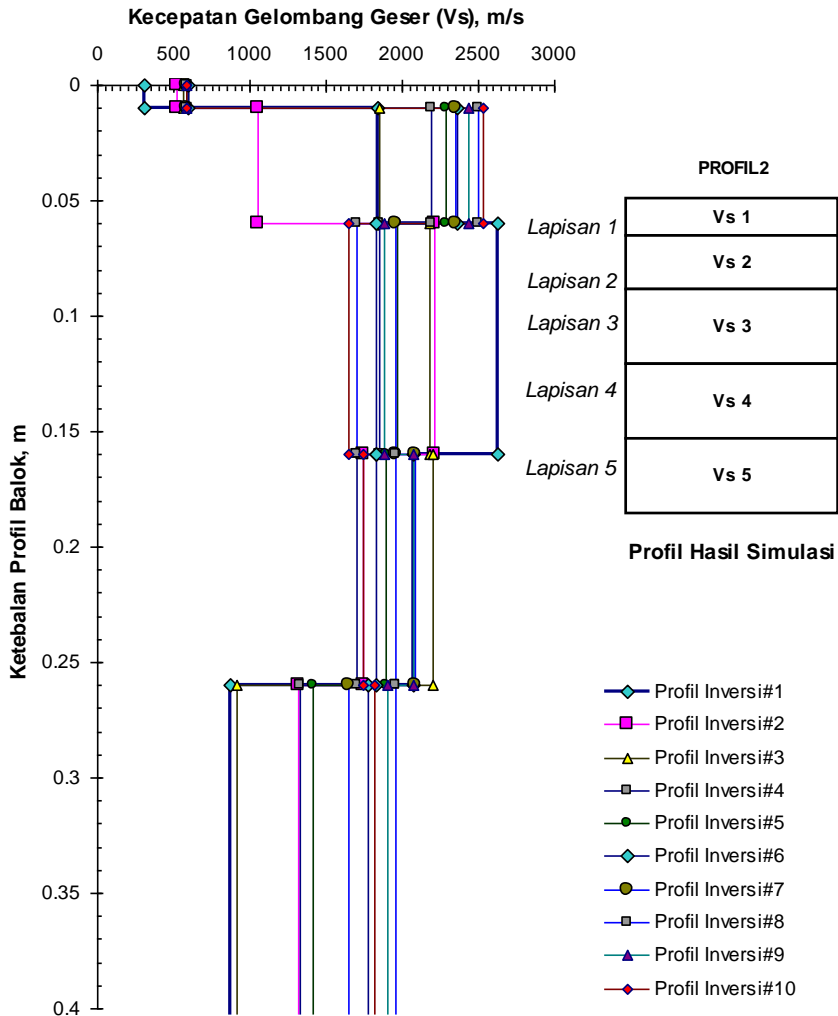


Gambar 8.11: Profil SMP analisis 2 D untuk variasi rasio $\lambda - H$ pada model 2



Gambar 8.12: Profil SMP 1 hingga SMP 6 untuk variasi rasio $\lambda - H$ model 2

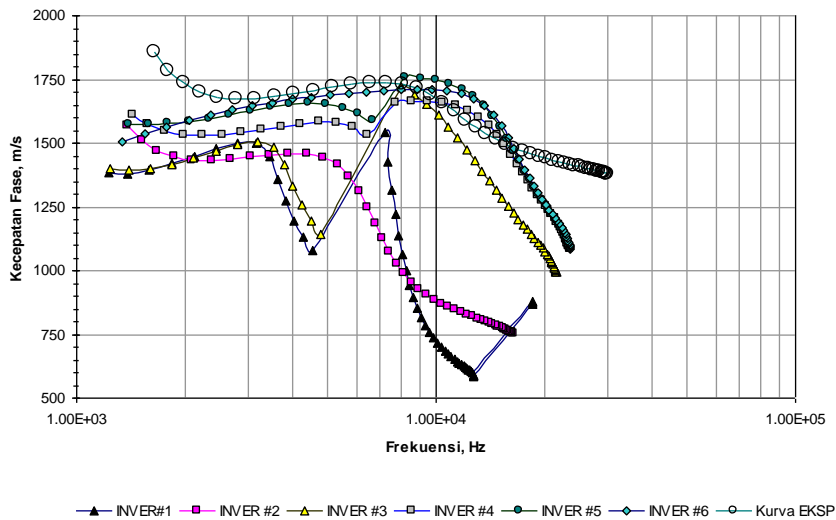
Selanjutnya dilakukan proses simulasi dan optimasi profil SMP terpilih untuk mendapatkan profil model dengan kurva teori terbaik. Gambar 8.13 menunjukkan profil hasil simulasi dan inversi untuk perubahan parameter V_s . Proses iterasi untuk mendapatkan kurva optimum dilakukan sebanyak 10 kali.



Gambar 8.13: Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 2 dengan parameter inversi V_s

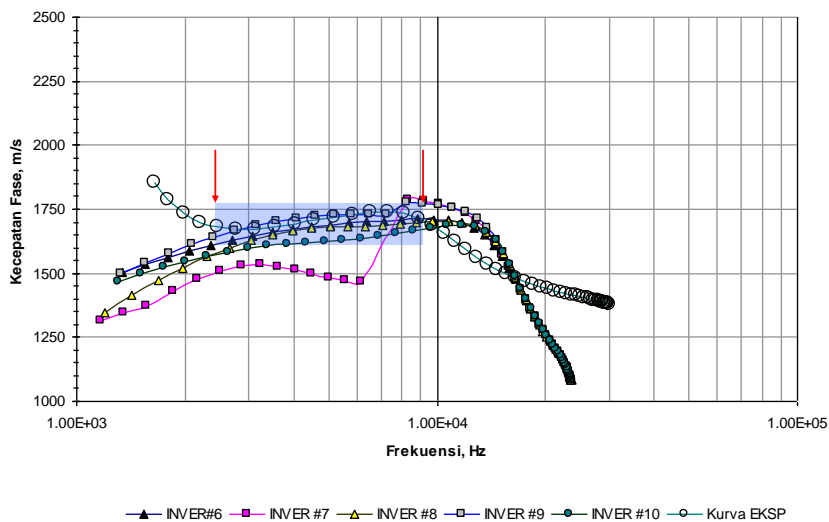
Dari Gambar 8.13 ditunjukkan bahwa kesepuluh profil simulasi menunjukkan nilai V_s lapisan yang sangat bervariasi kecuali pada lapisan pertama yang mana keseluruhan profil menunjukkan nilai V_s yang rendah untuk bahan beton yaitu di bawah 1000 m/s. Hasil ini memperlihatkan adanya lapisan lunak (*weak-layer*) di permukaan model perkerasan. Berbeda dengan hasil analisis sebelumnya yang menggunakan sistem 1,

lapisan lunak tidak dapat dideteksi karena kurangnya lapisan model yang diberikan. Gambar 8.14 dan 8.15 menjelaskan kurva model kecepatan fase yang dihasilkan untuk kesepuluh profil inversi dalam Gambar 8.13. 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 8.15). Hasil resolusi lapisan dari profil ke-9 menunjukkan nilai yang cukup baik, yaitu di atas nilai 0,1 (Gambar 8.16). 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 8.15).

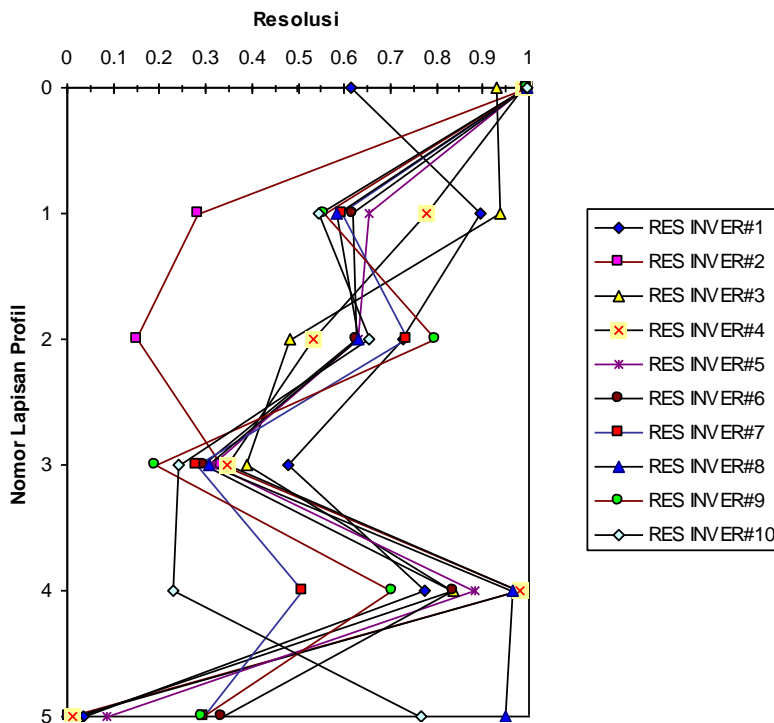


Gambar 8.14: Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 2 dengan parameter inversi v_s pada proses inversi ke-1 hingga ke-6

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 lain berikutnya, dengan membandingkan hasilnya terhadap analisis model 3 D.



Gambar 8.15: Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 2 dengan parameter inversi v_s pada proses inversi ke-6 hingga ke-10



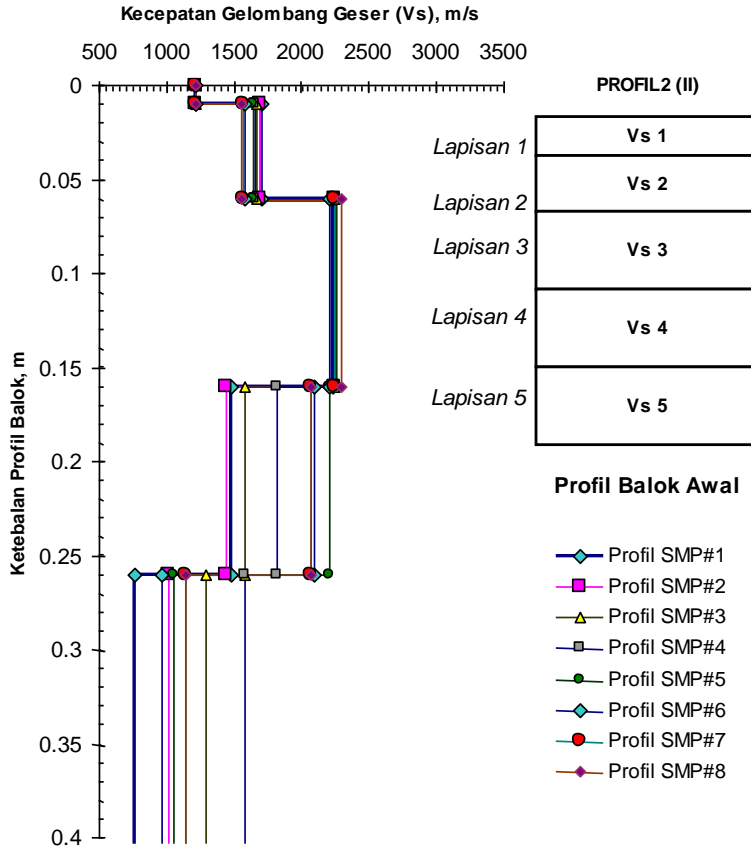
Gambar 8.16: Hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi 2 D pada model 2

2) Simulasi Model 3 D

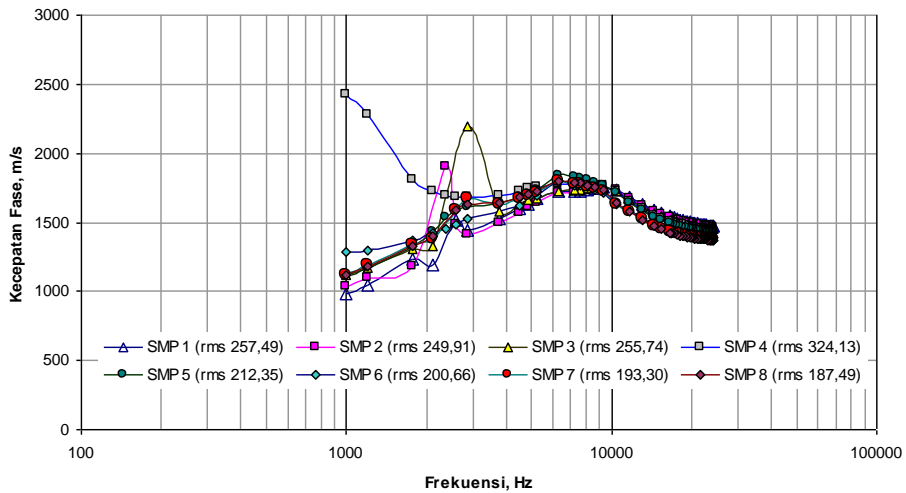
Dalam simulasi model 3 D, tidak digunakan profil model pertama dikarenakan nilai lapisan yang sangat terbatas dan telah dibuktikan dalam analisis model 2 D bahwa profil model pertama kurang menunjukkan kesesuaian kurva teori disebabkan terbatasnya lapisan model (Gambar 8.1). Dengan demikian simulasi model 3 D hanya dilakukan untuk sistem model ke-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 8.17. Kurva dispersi kecepatan fase dari profil SMP diberikan dalam Gambar 8.18. 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 0,650. Dari Gambar 8.18 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.

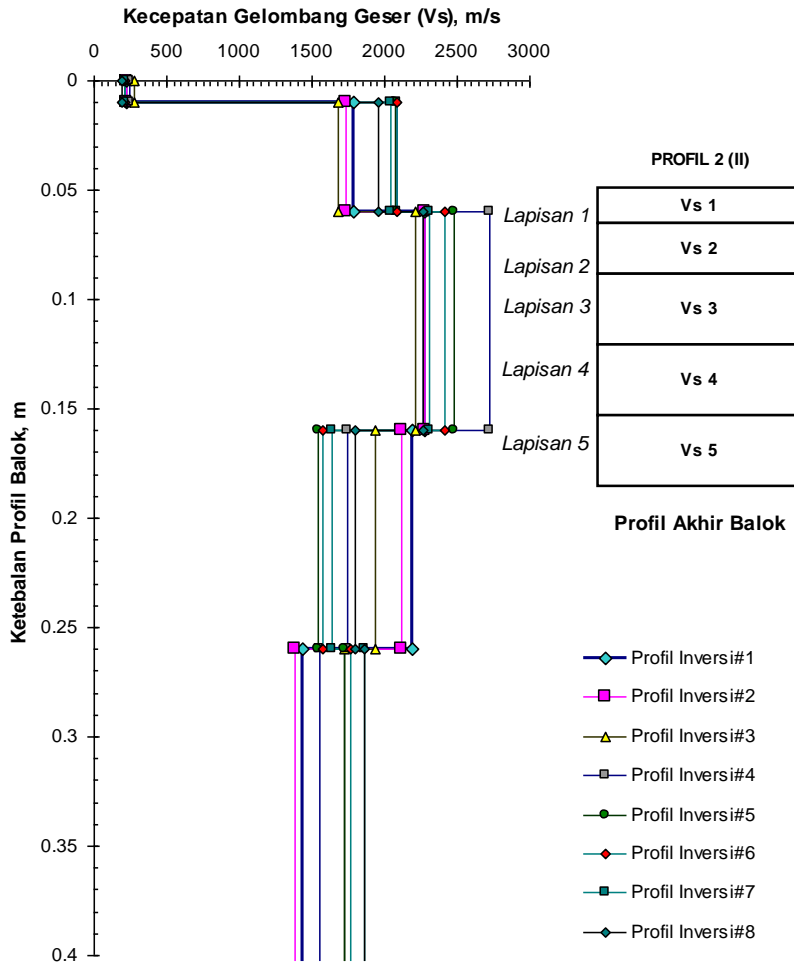
Selanjutnya proses inversi dan optimasi dilakukan untuk mendapatkan profil teori 3 D yang baik. Iterasi dengan parameter peubah pada V_s saja dilakukan sebanyak 8 kali dan hasil profil simulasi diberikan dalam Gambar 8.19. Dari Gambar 8.19 dapat dijelaskan bahwa keseluruhan profil sangat bersesuaian untuk lapisan pertama, yang menunjukkan lapisan pelemahan pada profil model perkerasan dengan nilai V_s berkisar antara 200 hingga 300 m/s dengan ketebalan lapisan pelemahan sekitar 0,01 m (1 cm).



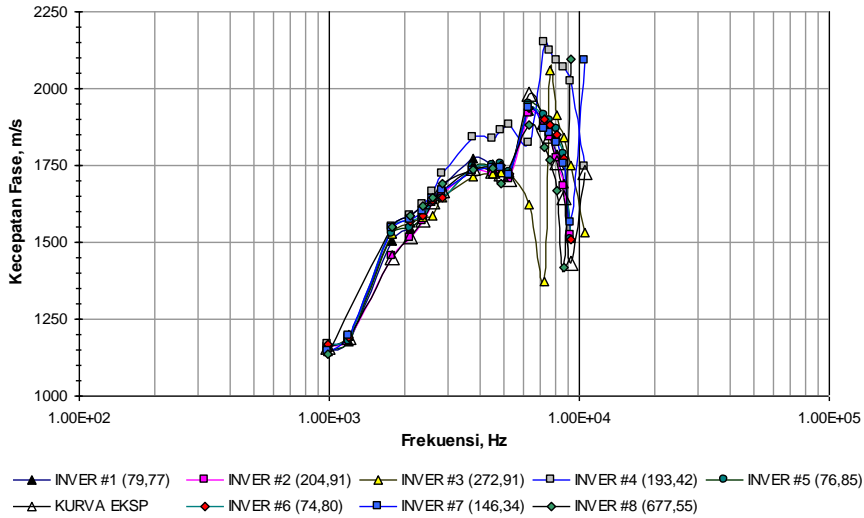
Gambar 8.17: Profil SMP analisis 3 D untuk variasi rasio $\lambda - H$ pada model 2



Gambar 8.18: Kurva dispersi profil SMP 1 hingga SMP 8 variasi rasio $\lambda - H$ untuk analisis 3 D pada model 2

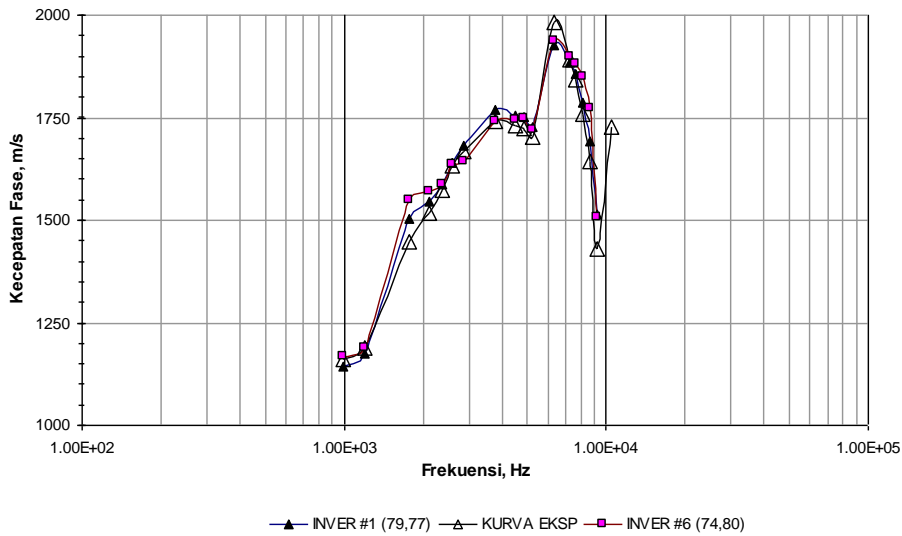


Gambar 8.19: Profil hasil simulasi untuk analisis 3 D pada sistem 2 dengan parameter V_s



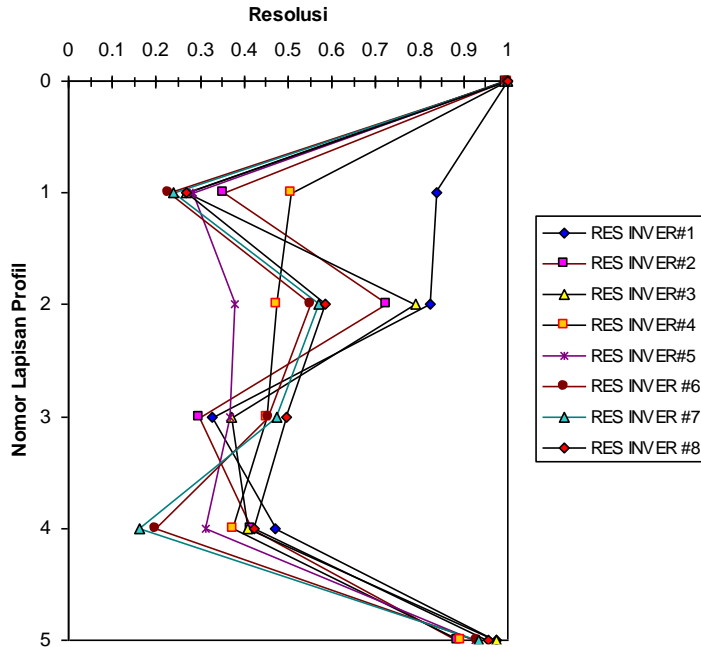
Gambar 8.20: Kurva dispersi profil hasil simulasi untuk analisis 3 D pada sistem 2 dengan parameter V_s

Adanya kondisi lapisan pelemahan pada profil balok/slab ini hampir sama dengan hasil yang ditunjukkan oleh analisis 2 D (Gambar 8.13). 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 8.20). Detail kesesuaian antara kurva teori dan eksperimen model 3 D untuk profil ke-6 ditunjukkan dalam Gambar 8.21. Dalam Gambar 8.21 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 8.21: Detail kesesuaian kurva teori simulasi 3 D profil ke-1 dan ke-6 terhadap kurva eksperimen

Kondisi kesesuaian profil model 3 D di atas dapat dicermati juga dalam hasil analisis resolusi antar lapisan yang dilakukan. Gambar 8.22 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 diselesaikan dengan melakukan iterasi optimasi lagi untuk mendapatkan kesesuaian yang lebih baik 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 kejitian model 2 D dan 3 D, analisis selanjutnya dilakukan untuk sistem profil model homogen berkecepatan fase rendah diberikan pada bagian 2 di bawah ini.



Gambar 8.22: Hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi 3 D pada model 2

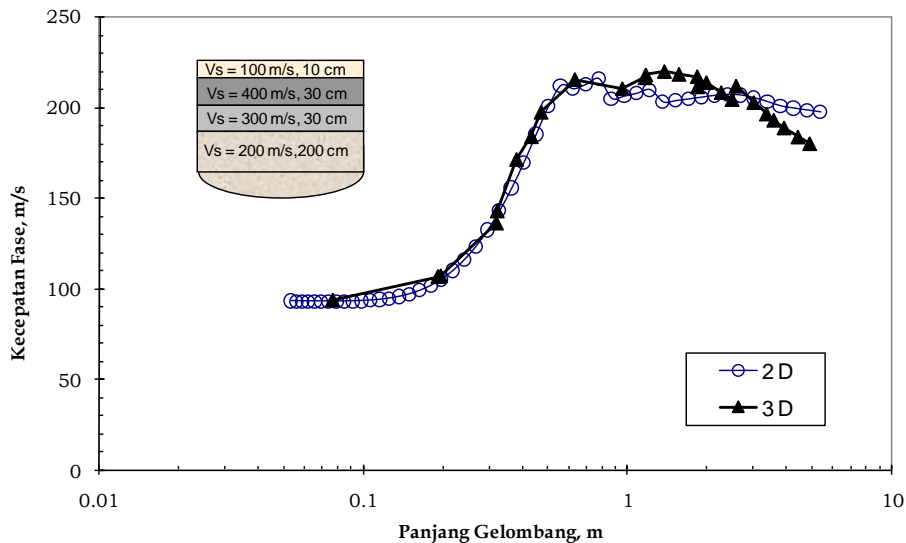
8.2.2 Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen dengan Kecepatan Gelombang Geser yang Rendah

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 rendah). Profil ini diibaratkan lapisan jalan tanpa perkerasan yang disusun sebagai lapisan fondasi dipadatkan dan lapisan tanah. Karakteristik dinamik model sistem 3 ini diberikan dalam Tabel 8.3.

Tabel 8.3: 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 8.23 di bawah ini. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa kurva dispersi teoritik kecepatan fase model 2 D dan 3 D terlihat berpadanan dan cenderung hampir sama. Perbedaan hanya terlihat minimal saja yaitu pada kurva dengan panjang gelombang di atas 2 meter.



Gambar 8.23: Perbandingan hasil simulasi 2 D dan 3 D untuk profil model sistem 3

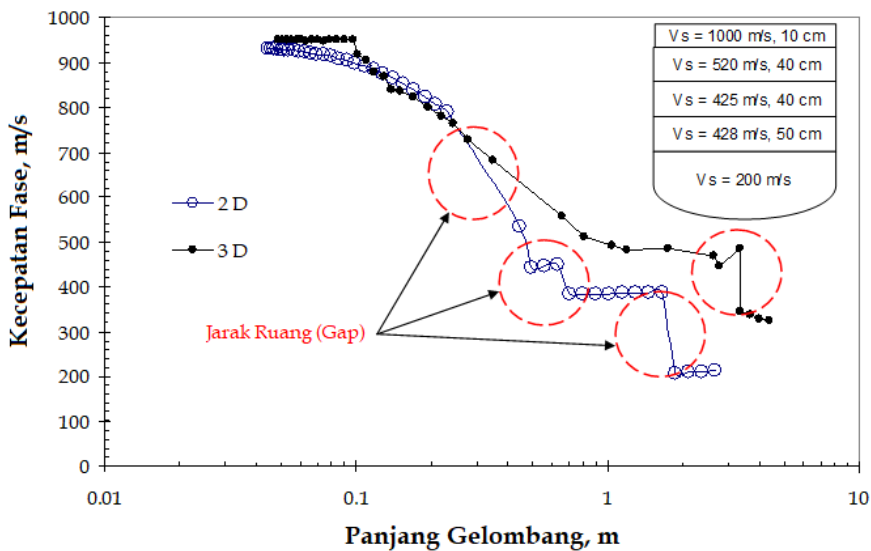
Trend kurva yang relatif sama ini menunjukkan bahwa pada profil sistem dengan kekakuan setiap lapisan rendah dan perbedaan antar lapisan tidak terlalu ekstrem; model 2 D menghasilkan kurva dispersi yang sepadan dengan model 3 D. Kondisi ini disebabkan oleh tidak adanya perilaku gelombang pantulan yang dimodelkan dalam simulasi. Jika perbedaan antar lapisan terlalu ekstrem, maka perilaku pemantulan (refleksi) dan pembiasan (refraksi) gelombang menjadi hal yang dominan dan perlu perhatian.

8.2.3 Model Artifisial Tidak Reguler (Irregular) 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 regular 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 Imaginer berdomain spasial. Melalui penentuan nilai sudut fasenya, kurva dispersi kecepatan fase selanjutnya dapat dihasilkan.



Gambar 8.24: Kurva dispersi teori 2 D dan 3 D untuk profil artifisial sistem 4

Gambar 8.24 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.

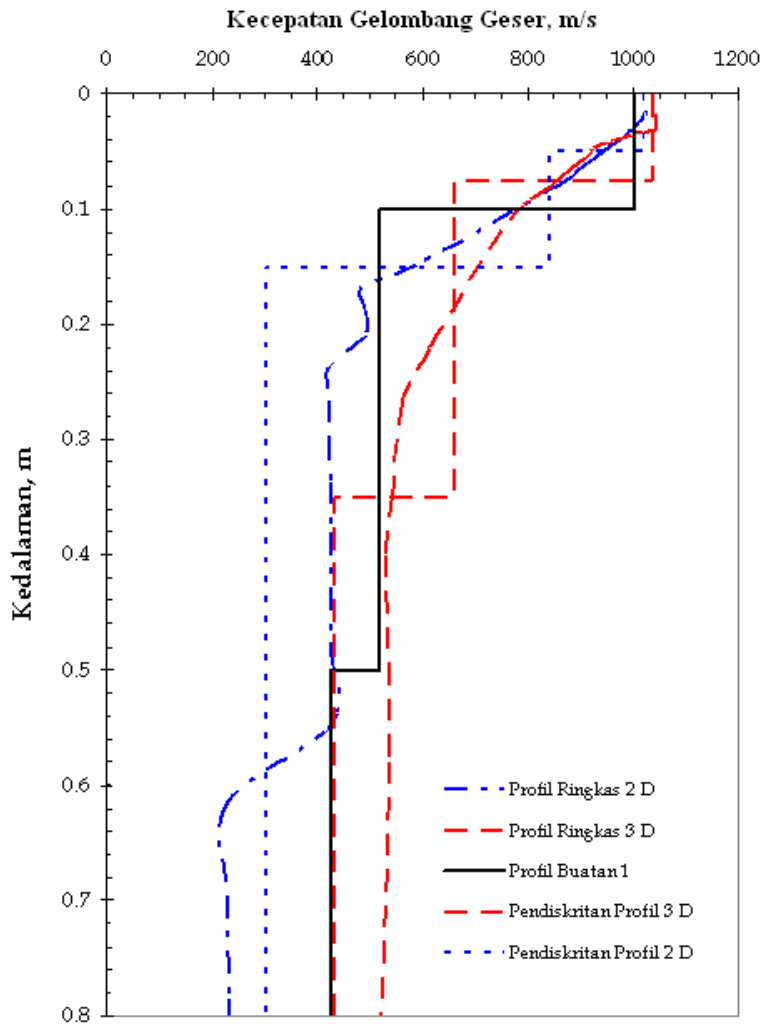
Menggunakan data kurva dispersi kecepatan fase dilakukan inversi sederhana (*simple inversion*) yang direkomendasikan oleh Richart dkk. (1970), kepada kedua model tersebut (2 D dan 3 D). Hasil inversi sederhana tersebut selanjutnya didiskritkan (Gambar 8.25) untuk memudahkan ilustrasi perbandingan. Perbedaan panjang gelombang dan kecepatan fase pada kedua model kurva dispersi teori yang jelas ditunjukkan dalam Gambar 8.24, 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 8.4 dan Gambar 8.26.

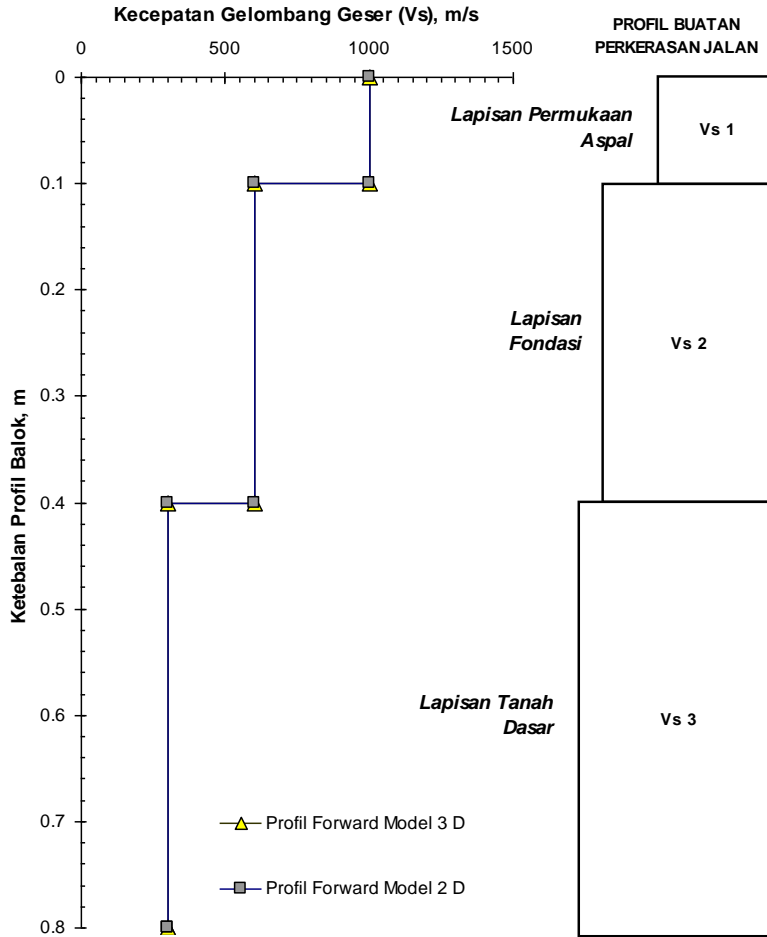
Tabel 8.4: Karakteristik dinamik lapisan sistem profil jalan model buatan

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 8.27. 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 dengan tingkat kekakuan lapisan yang semakin menurun pula.

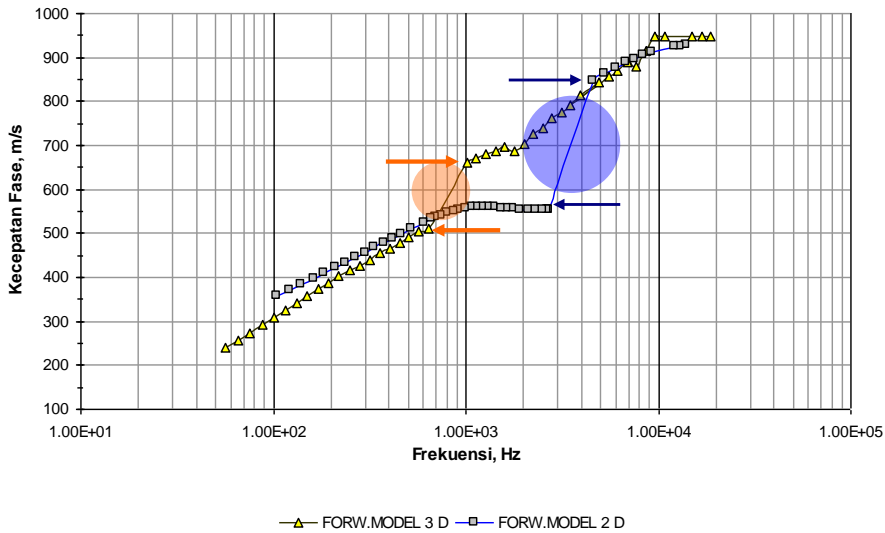


Gambar 8.25: Perbandingan profil pendiskritan dan hasil inversi sederhana pada model 2 D dan 3 D terhadap profil sistem 4



Gambar 8.26: 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 8.27: 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.

8.3 DISKUSI 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:

$$w(r) = -\frac{i\pi qR}{2} \sum_{l=1}^{2N} \frac{(\phi_z^{ll})^2 J_1(k_l R_1) H_0^{(2)}(k_l r)}{k_l} \quad (8.1)$$

dimana q adalah amplitudo beban disk tegak (*vertical disk load*) pada radial R , r merupakan kedudukan dimana simpangan tegak diukur, $(\phi_z^{ll})^2$ adalah simpangan tegak pada node ke l di permukaan, k_l merupakan nomor gelombang sebagai nilai eigen

ke 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 8.1 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 zona 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 diuraikan 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.

9

APLIKASI TEKNOLOGI SASW PADA PERKERASAN JALAN

9.1 PENGANTAR

Pada bab-bab sebelumnya telah dijelaskan bagaimana proses dan teknik analisa yang digunakan dalam teknologi SASW untuk mengevaluasi perkerasan jalan. Tahapan analisis dalam SASW dimulai dengan pengambilan data di lapangan, pembangunan kurva dispersi dan proses inversi untuk mendapatkan profil kekakuan bahan jalan. Bab ini menjelaskan dua studi kasus penerapan teknologi SASW untuk pengukuran kekakuan bahan jalan pada model perkerasan jalan dan perkerasan jalan terpasang (*existing pavement*). Penerapan pada model perkerasan jalan dipertimbangkan untuk mendapatkan validasi pengukuran SASW yang tepat terutama untuk perbandingan dengan pengujian kekakuan bahan di laboratorium dan verifikasi tebal lapisan yang diperoleh dari pengukuran.

9.2 APLIKASI PADA MODEL PERKERASAN JALAN

Untuk model perkerasan yang dibuat didasarkan pada asumsi lalu lintas rendah yang mempertimbangkan parameter variasi tebal lapisan perkerasan dan variasi bahan penyusun terkontrol. Jenis perkerasan yang digunakan adalah lapisan AC (Asphalt Concrete) dan ATB (Asphalt Treatment Base). Tebal lapisan permukaan perkerasan terpasang pada model yang digunakan adalah 3 cm dan 5 cm. Tabel 9.1 berikut ini menjelaskan variasi pemodelan fisik yang digunakan.

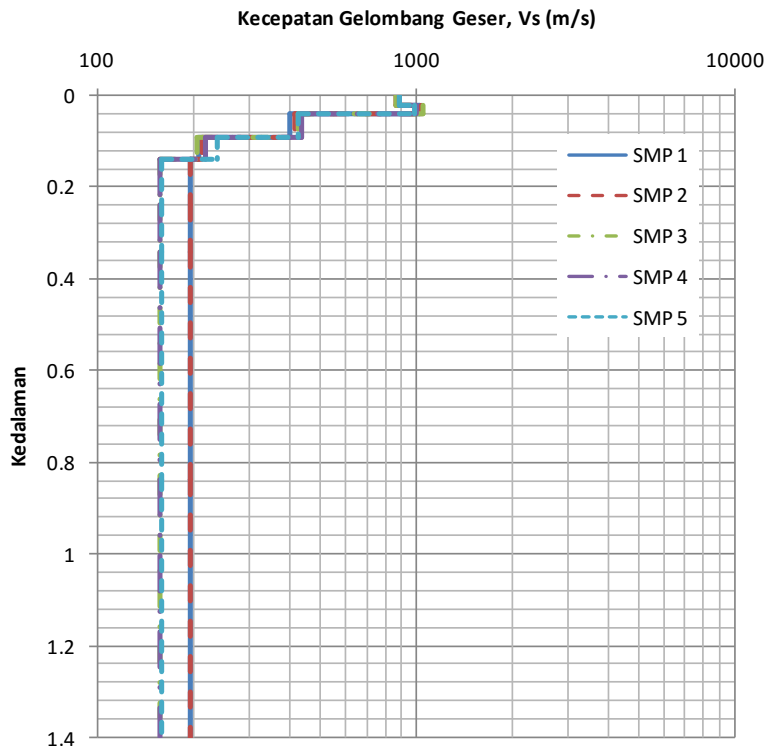
Tabel 9.1: Model perkerasan jalan

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

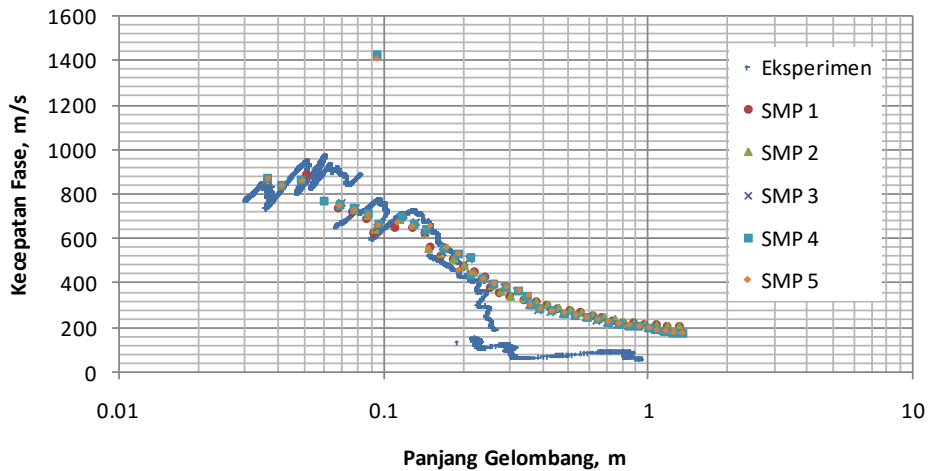
Suatu asumsi profil model perkerasan perlu disusun terlebih dahulu dalam menjalankan analisis data seismik dalam pengujian SASW. Dalam analisis ini, profil awal SMP disusun dalam 8 lapisan. Lapisan pertama dan kedua mewakili lapisan permukaan jalan, sedangkan lapisan ketiga hingga keenam merupakan lapisan 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.

Selanjutnya model kedepan (forward modeling) berbasis matrik kekakuan 3 D dijalankan guna mendapatkan profil SMP dengan mengubah nilai rasio kedalaman dan panjang gelombang ($H-\lambda$). Nilai rasio yang digunakan adalah 0,51 hingga 0,59. Rasio $H-\lambda$ yang digunakan adalah nilai rasio yang memiliki nilai kesalahan RMS terendah. Gambar 9.1 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 9.2 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 90,65 m/s (Gambar 9.3). Berdasarkan profil model SMP ke 3, proses inversi lanjutan dilaksanakan.

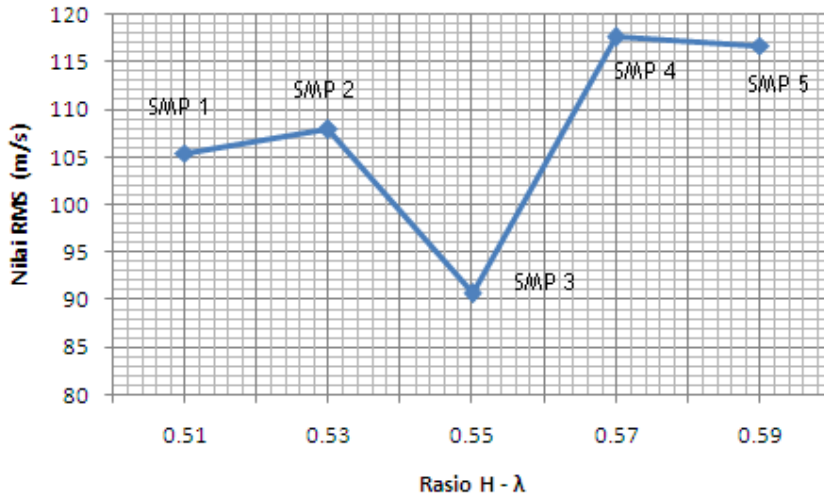
Gambar 9.4 hingga Gambar 9.10 menunjukkan proses iterasi yang dijalankan dalam analisis inversi. Kurva teori dan profil SMP ketiga dijadikan basis model. Algoritma kemiripan maksimum atau maximum likelihood digunakan dalam proses optimasi ini. Setelah dilakukan iterasi hingga kedelapan, diperoleh padanan yang cukup baik antara kurva dispersi teori terhadap kurva eksperimen pada model ATB (Gambar 9.10). 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 m/s, maka kesalahan simpangan dari RMS sebesar 12,22 m/s hanya sebesar 0,0495 (4,95 %). Mengingat kurva dispersi untuk perkerasan bersifat menyebar maka kesalahan tersebut sudah termasuk pencapaian optimasi yang baik.



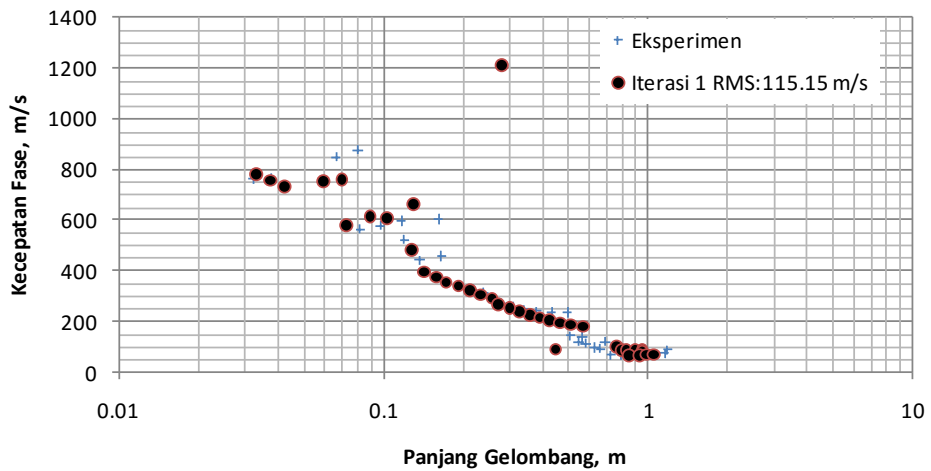
Gambar 9.1: Profil SMP yang diperoleh dari beberapa variasi rasio H/λ



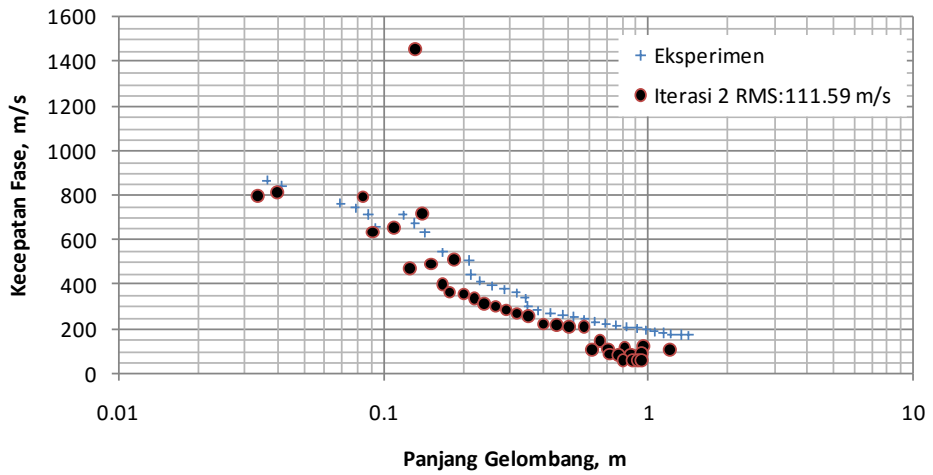
Gambar 9.2: Perbandingan kurva dispersi teori dari beberapa profil SMP terhadap kurva eksperimen pada model ATB



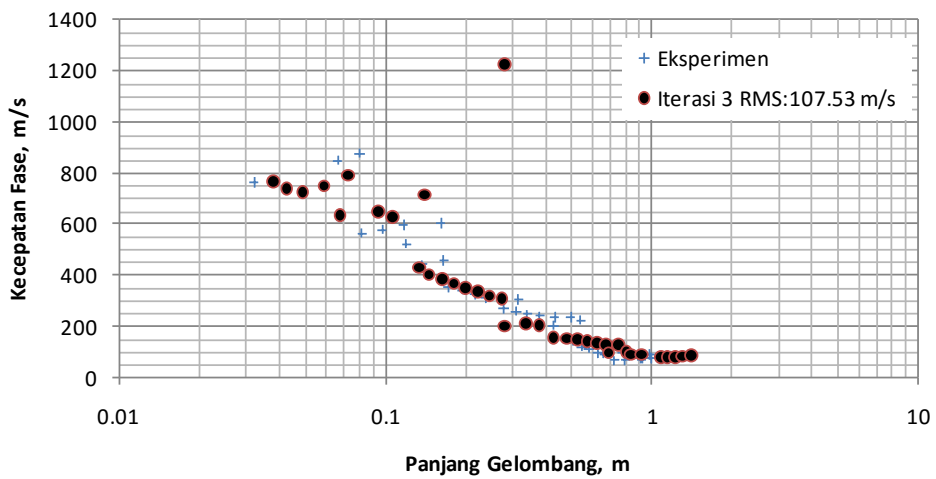
Gambar 9.3: Profil SMP berdasarkan variasi rasio $H-\lambda$ dan nilai RMS yang dihasilkan



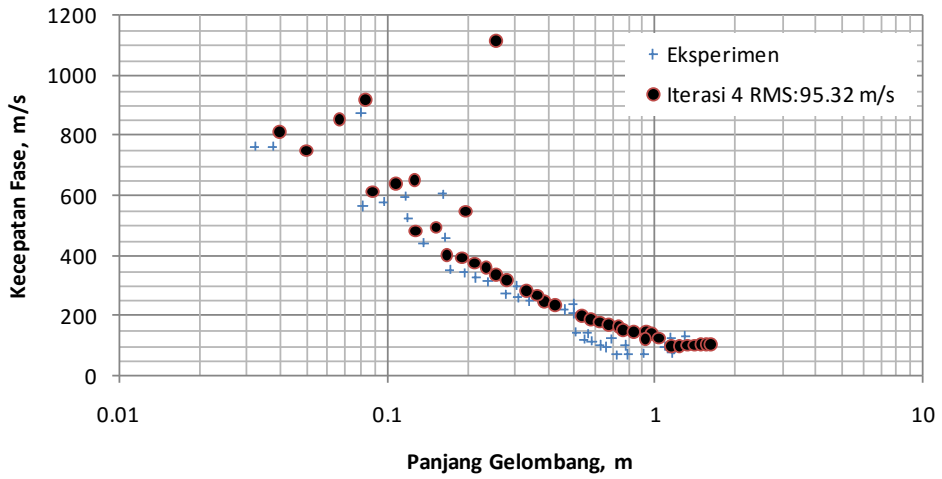
Gambar 9.4: Kurva dispersi teori hasil iterasi 1 terhadap kurva eksperimen



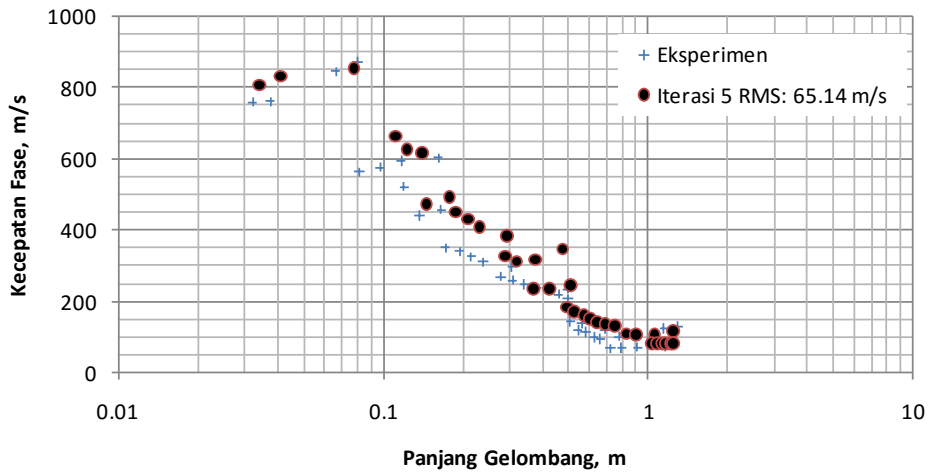
Gambar 9.5: Kurva dispersi teori hasil iterasi 2 terhadap kurva eksperimen



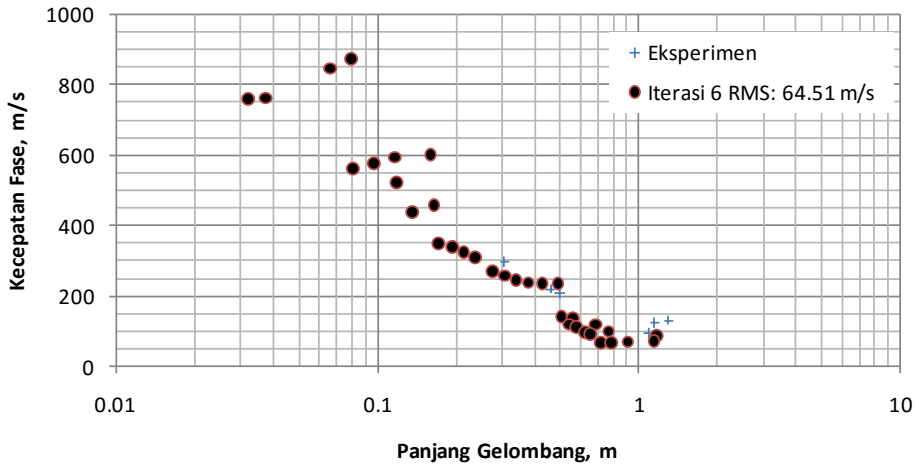
Gambar 9.6: Kurva dispersi teori hasil iterasi 3 terhadap kurva eksperimen



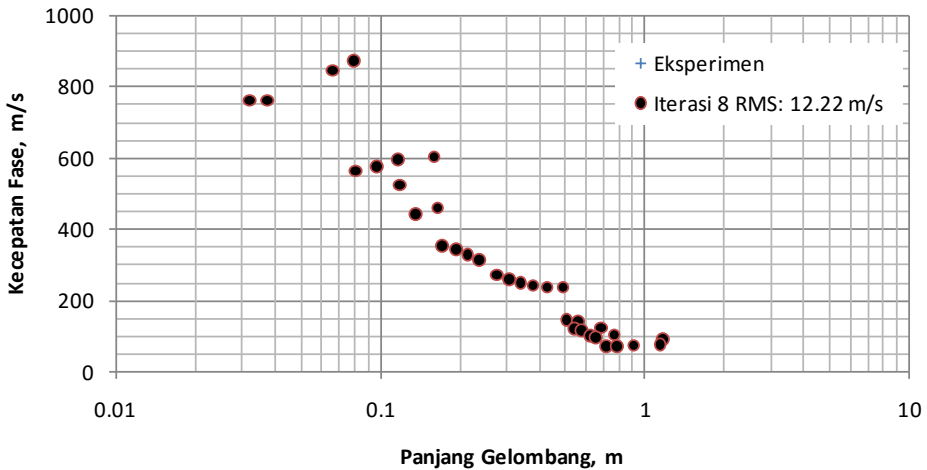
Gambar 9.7: Kurva dispersi teori hasil iterasi 4 terhadap kurva eksperimen



Gambar 9.8: Kurva dispersi teori hasil iterasi 5 terhadap kurva eksperimen



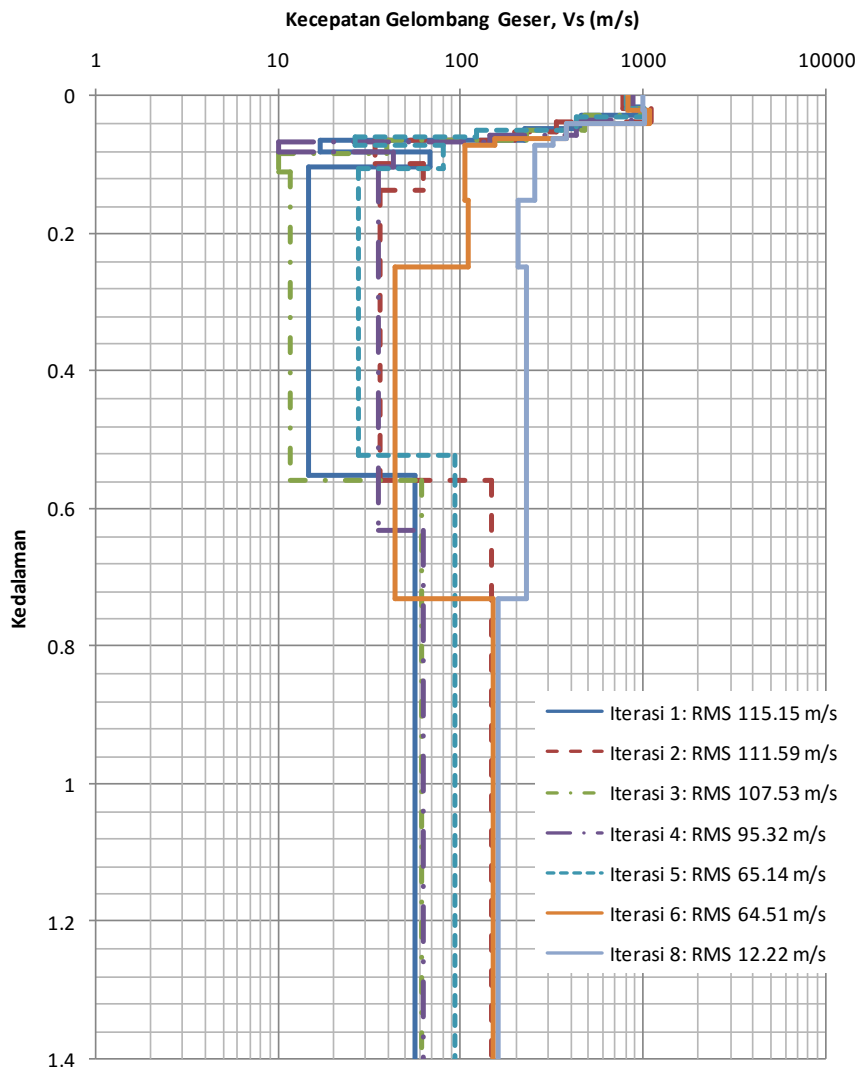
Gambar 9.9: Kurva dispersi teori hasil iterasi 6 terhadap kurva eksperimen



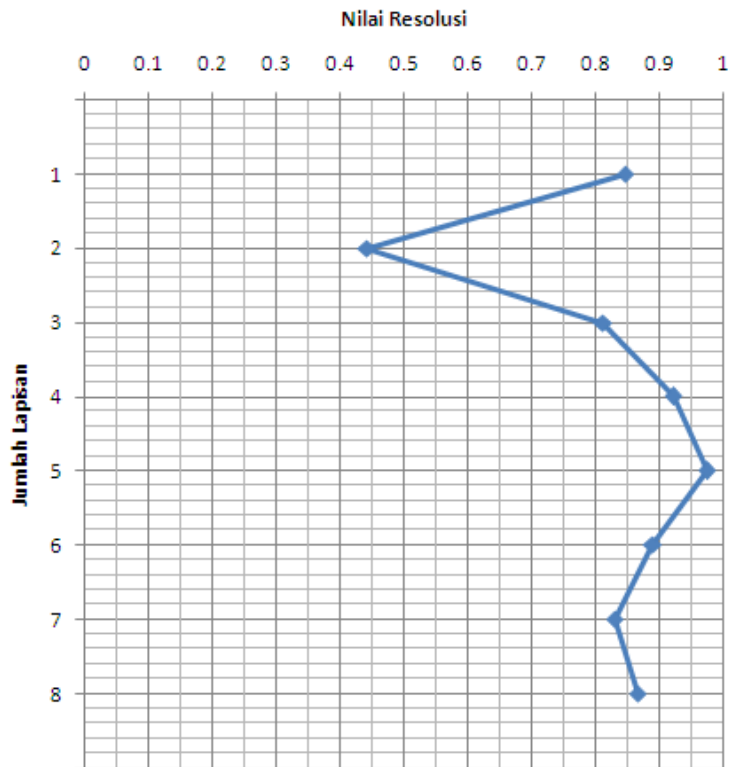
Gambar 9.10: Kurva dispersi teori hasil iterasi 8 terhadap kurva eksperimen

Profil kecepatan gelombang geser untuk model perkerasan ATB yang merupakan hasil dari proses inversi ditunjukkan dalam Gambar 9.11. Beberapa variasi profil kecepatan gelombang geser juga ditunjukkan. Pemilihan profil kedelapan untuk hasil akhir analisis inversi ini juga mempertimbangkan hasil resolusi yang didapatkan dalam analisis. Gambar 9.12 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 9.11: Perbandingan profil kecepatan gelombang geser hasil analisis inverse untuk model perkerasan ATB



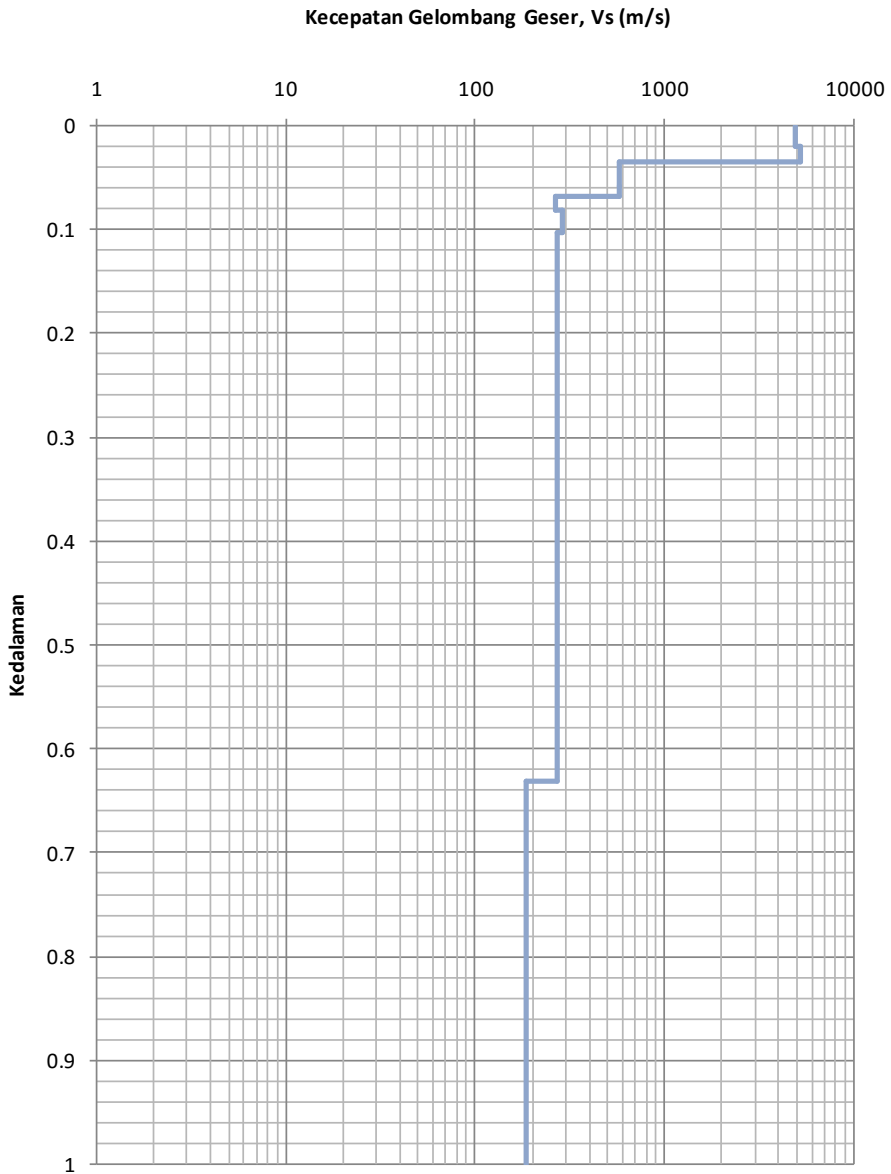
Gambar 9.12: Hasil resolusi analisis inverse untuk profil kedelapan model ATB

Menggunakan teori elastic linier, 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. Berat unit (volume) setiap lapisan didapatkan dari hasil pengujian laboratorium dan untuk nilai rasio Poisson digunakan nilai 0,25 untuk aspal dan 0,33 untuk bahan lapisan lainnya (lapisan fondasi dan tanah dasar). Hasil perhitungan modulus elastisitas bahan lapisan model perkerasan jalan jenis ATB diberikan pada Tabel 9.2.

Tabel 9.2: 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 9.12 dan nilai modulus elastisitas diberikan dalam Tabel 9.3.



Gambar 9.12: Profil kecepatan gelombang geser untuk model perkerasan AC

Tabel 9.3: Hasil perhitungan modulus elastisitas profil model AC

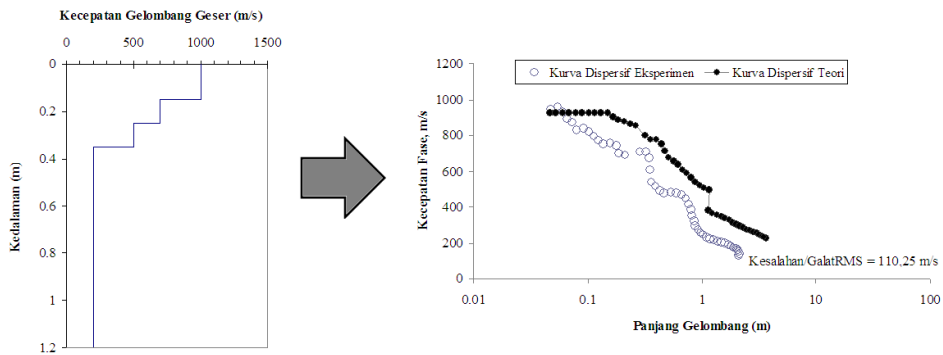
Jenis Lapisan	Kecepatan Gelombang Geser (m/s)	Modulus Elastisitas (MPa)
Lapisan Permukaan	908,19	5045,95
Lapisan Fondasi	335,567	573,93
Lapisan Fondasi Bawah	234,02	265,18
Lapisan Tanah Dasar	220,75	238,19

9.3 APLIKASI PADA PERKERASAN JALAN TERPASANG

Studi kasus untuk aplikasi berikutnya dilaksanakan pengukuran SASW pada perkerasan jalan terpasang di Jalan Cagak Subang. Tabel 9.4 menunjukkan profil SMP yang digunakan. Berdasarkan profil SMP tersebut, kurva dispersif teori dibangunkan (Gambar 9.13). Kurva dispersi teori dari profil SMP tersebut, selanjutnya dipadankan (*fitted*) kepada kurva eksperimen. Apabila perbandingan tak sesuai, maka profil SMP perlu disesuaikan/diubah untuk mendapatkan kurva teori baru yang lebih mendekati kurva eksperimen. Kemudian profil SMP disesuaikan berdasarkan informasi kurva dispersif eksperimen menjadi profil SMP tahap kedua.

Tabel 9.4: Parameter asumsi dalam profil SMP

No. Lapisan	Tebal	V_{SB}	γ	ν	D
1	0,05	1000	2100	0,25	0,02
2	0,05	1000	2100	0,25	0,02
3	0,05	1000	2100	0,25	0,02
4	0,1	700	1800	0,33	0,02
5	0,1	500	1800	0,33	0,02
6	0,2	200	1800	0,33	0,02
7	0,2	200	1700	0,33	0,02
8	0,5	200	1700	0,33	0,02
9	100	200	1700	0,33	0,02

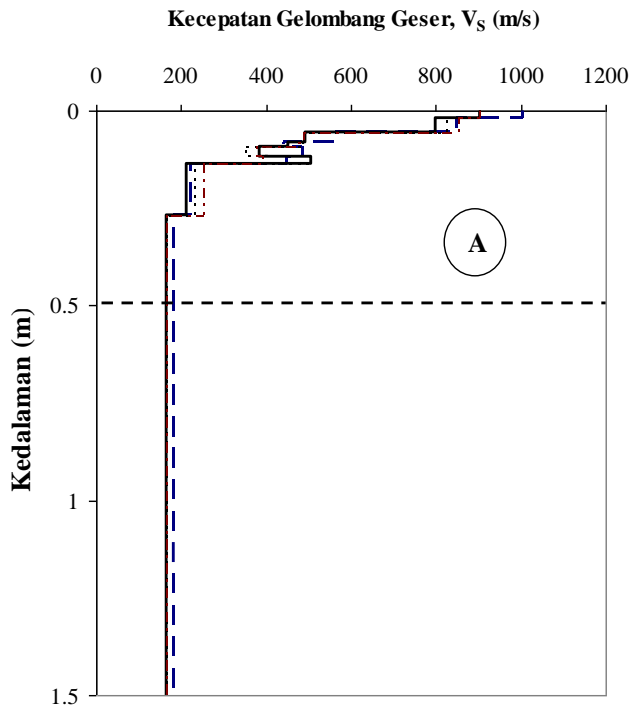


Gambar 9.13: Profil SMP dan kurva dispersif teori terhadap eksperimen

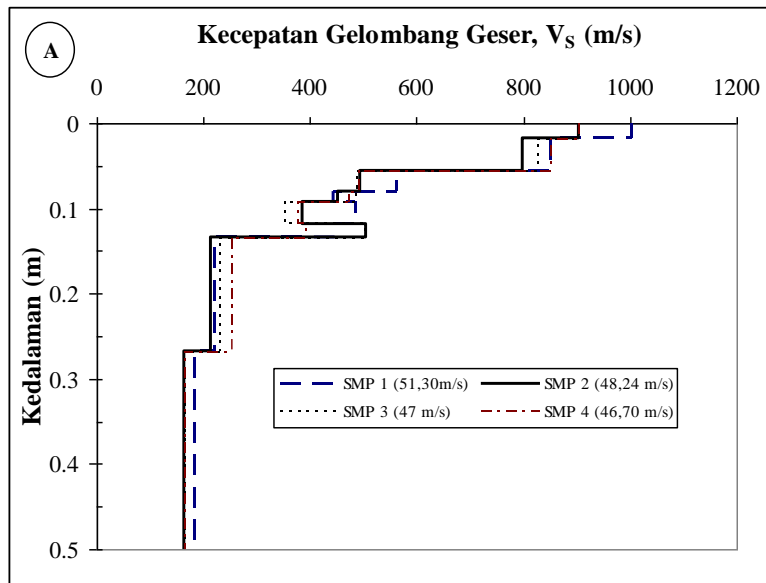
Sebelum masuk kepada proses iterasi dalam analisis inversi, dalam profil SMP perlu dicari rasio α yaitu kedalaman (H) terhadap panjang gelombang (λ) yang tepat yaitu nilai rasio yang memberikan nilai galat RMS terkecil. Gambar 9.14 menunjukkan empat profil SMP dan perbesaran (zoom) untuk lapisan atas (permukaan dan fondasi) dari nilai rasio α yang bervariasi. Kurva dispersif teori masing-masing profil SMP diberikan dalam Gambar 9.15. Dari analisis yang diperoleh, maka profil dengan rasio $\alpha = 0.585$ karena menghasilkan galat RMS terkecil sebesar = 46,70 m/s (Gambar 9.16).

Proses seterusnya dalam teknik SASW adalah proses inversi kurva dispersive eksperimen menggunakan profil SMP untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser. Berdasarkan profil SMP dengan rasio $\alpha = 0,585$, dilakukan proses inversi. Proses ini merupakan proses perpadanan (*fitting process*) yang dilakukan dengan iterasi (pengulangan perhitungan) yang melibatkan analisis optimasi sehingga mencapai galat RMS terkecil. Proses iterasi dihentikan jika telah terjadi konvergensi antara kurva teori terhadap eksperimen dengan menghasilkan galat RMS yang minimal. Profil dengan galat minimal ini adalah yang digunakan sebagai profil terbaik untuk mewakili kondisi perkerasan jalan.

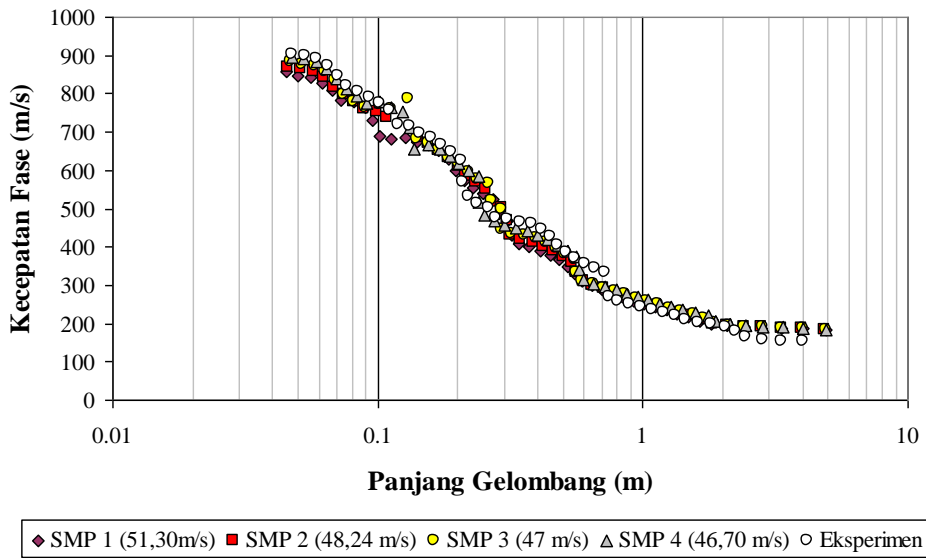
Gambar 9.17 menunjukkan hasil galat RMS pada setiap iterasi dalam proses inversi. Setelah dilakukan lima kali proses iterasi dihasilkan galat RMS terkecil sebesar 15,25 m/s. Kurva dispersif dan profil akhir kecepatan gelombang geser dari hasil inversi ini masing-masing ditunjukkan dalam Gambar 9.18 dan Gambar 9.19.



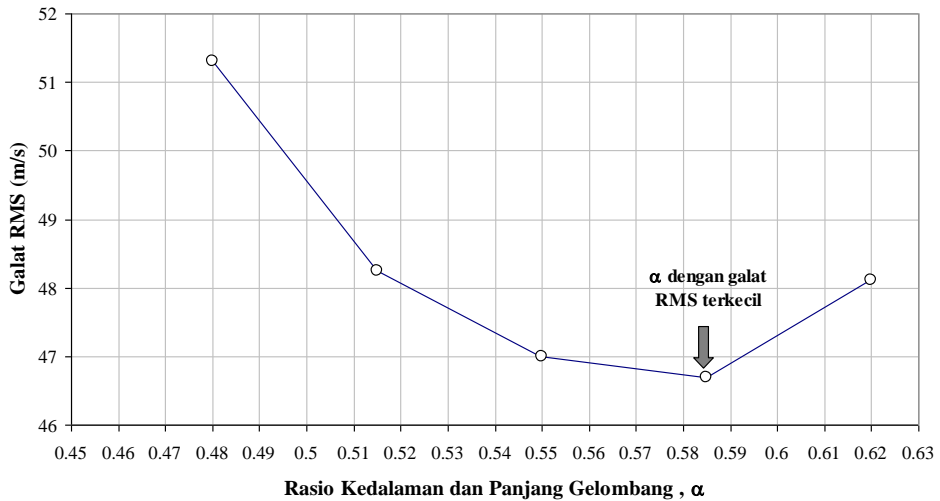
Perbesaran Potongan Profil A:



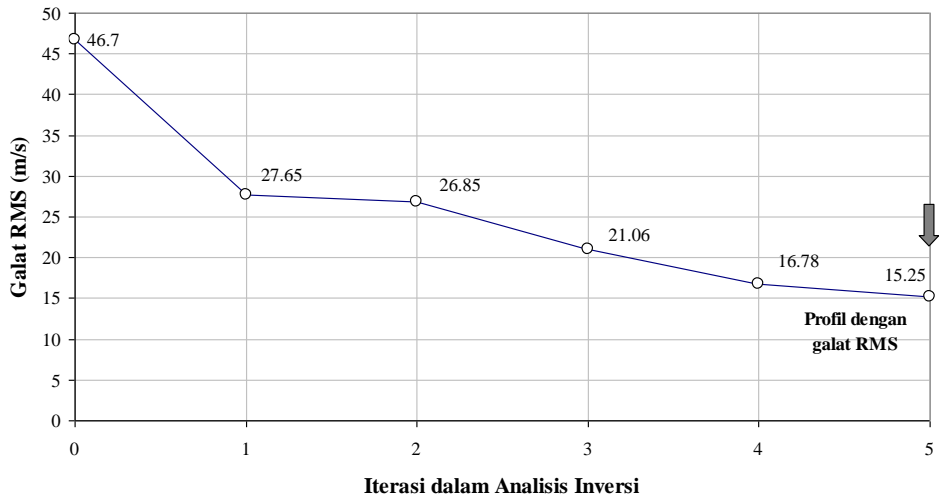
Gambar 9.14: Profil SMP dengan berbagai variasi rasio α



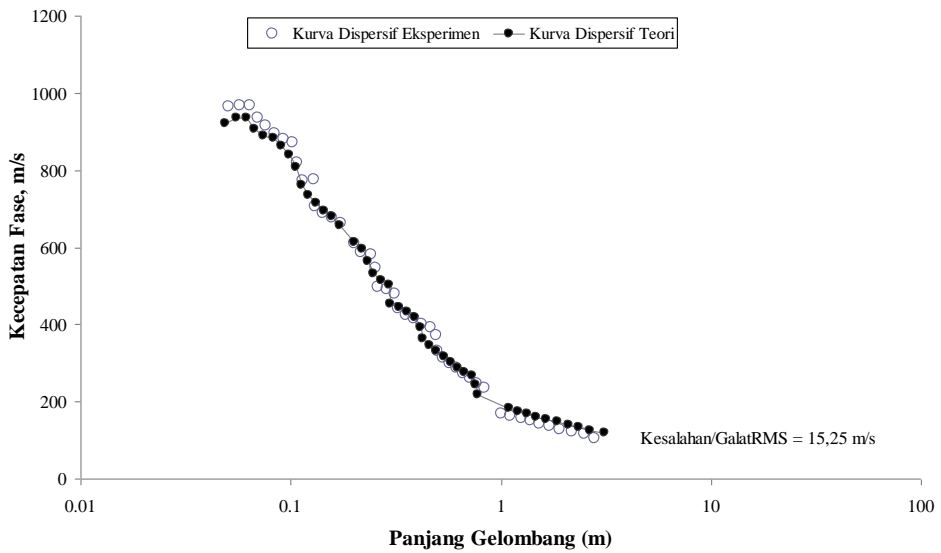
Gambar 9.15: Kurva dispersif teori dari profil SMP dengan variasi rasio α terhadap kurva eksperimen



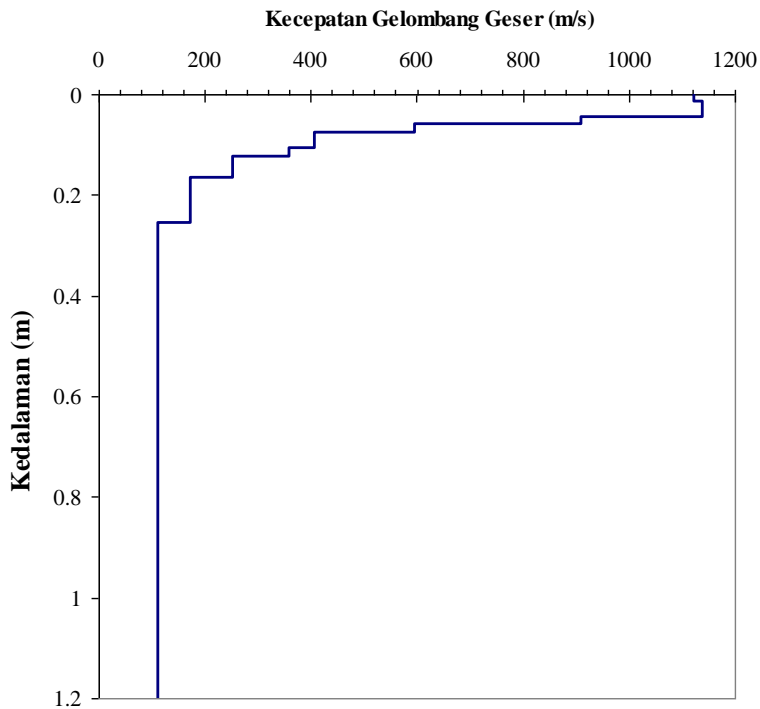
Gambar 9.16: Rasio α kedalaman dan panjang gelombang dalam analisis profil SMP terhadap nilai galat RMSnya



Gambar 9.17: Proses iterasi dan galat RMS yang diperoleh dari analisis inversi



Gambar 9.18: Proses iterasi yang menghasilkan padanan kurva dispersif teori terhadap eksperimen untuk profil akhir kecepatan gelombang geser

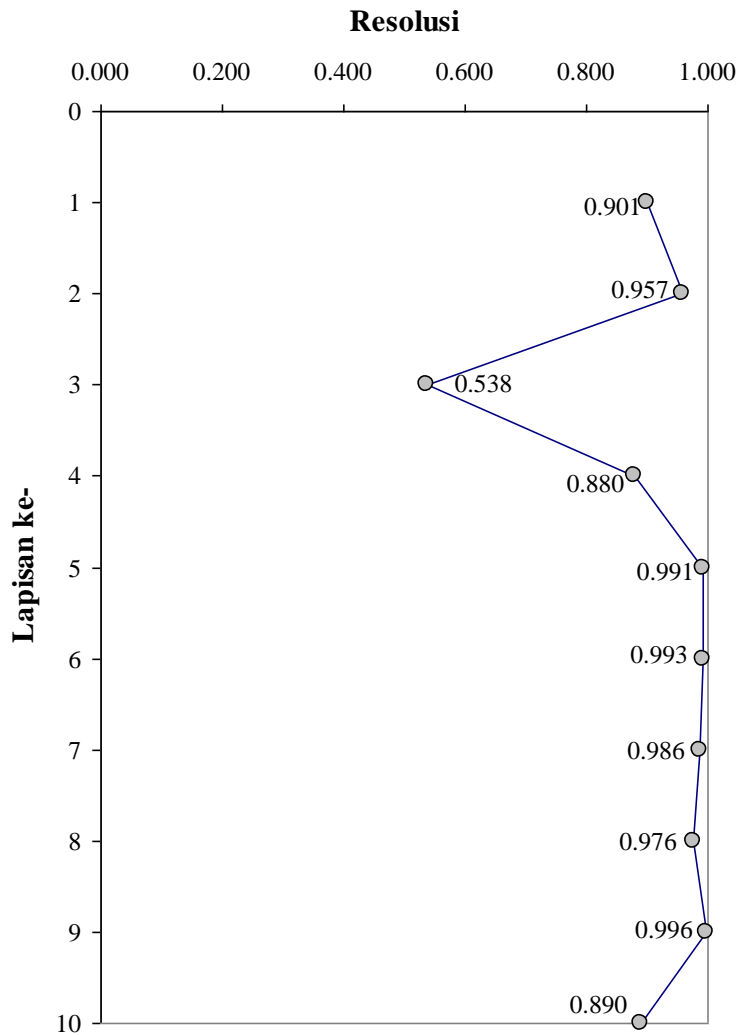


Gambar 9.19: Profil akhir kecepatan gelombang geser dengan galat RMS terkecil 15,25 m/s hasil inversi

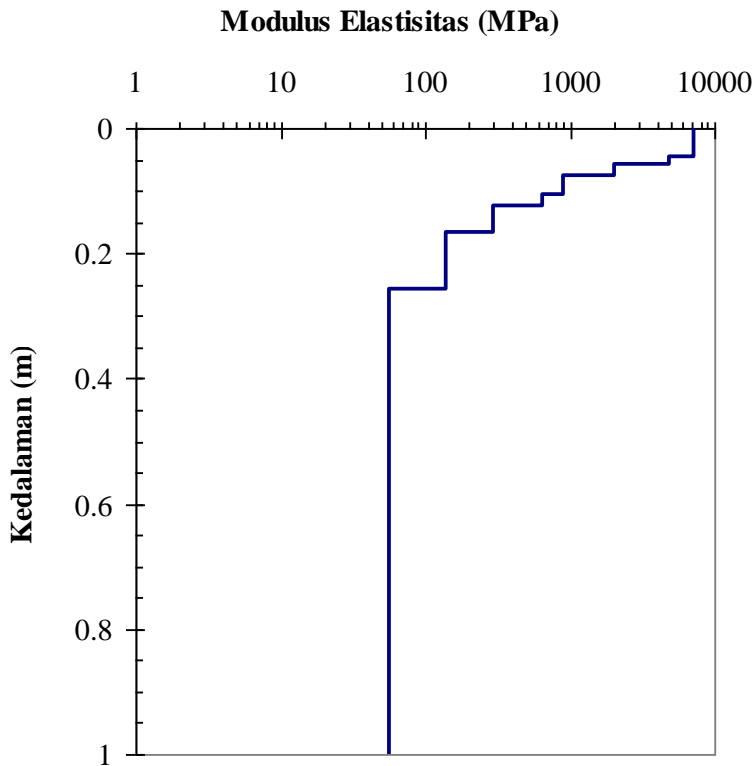
Untuk menunjukkan validasi teoritik bahwa profil hasil analisis telah memiliki kesesuaian yang baik terhadap data eksperimen perambatan gelombang dari pengukuran di lapangan digunakan parameter resolusi lapisan. Gambar 9.20 menunjukkan resolusi setiap lapisan dalam profil V_s perkerasan jalan yang dibangun. Hasil resolusi menjelaskan bahwa seluruh lapisan adalah baik karena mendekati resolusi bernilai 1, yang berarti model profil bersesuaian dengan data eksperimen yang didapatkan dari pengukuran perambatan gelombang.

Gambar 9.21 menunjukkan profil modulus elastisitas 1-D (terhadap kedalaman) dari profil kecepatan gelombang geser pada Sta 169+460 di Jalan Cagak, Subang. Perubahan modulus elastisitas terlihat secara jelas dalam profil yang menunjukkan perbedaan kekakuan lapisan bahan penyusun perkerasan jalan. Rata-rata pemberat (*weighted average*) menunjukkan bahwa lapisan permukaan AC/WC memiliki nilai modulus 3297 MPa, lapisan fondasi memiliki modulus rata-rata antara 205 MPa. Lapisan tanah dasar dideteksi pada nilai modulus rata-rata 79 MPa. Beberapa hal yang perlu diperhatikan di sini adalah nilai regangan dalam modulus elastisitas. Prinsip kerja teknik SASW adalah menggunakan analisis perambatan gelombang. Perambatan energi gelombang akan menghasilkan nilai tegangan pada regangan yang kurang dari 1

$\times 10^4$ % sehingga sifat material yang diukur dapat dipertimbangkan sebagai nilai modulus yang maksimum berdasarkan teori tegangan dan regangan yang digunakan dalam model konstitutif elastik linier.



Gambar 9.20: Kurva resolusi lapisan profil akhir V_s (Gambar 5.26)



Gambar 9.21: Profil modulus elastisitas perkerasan jalan

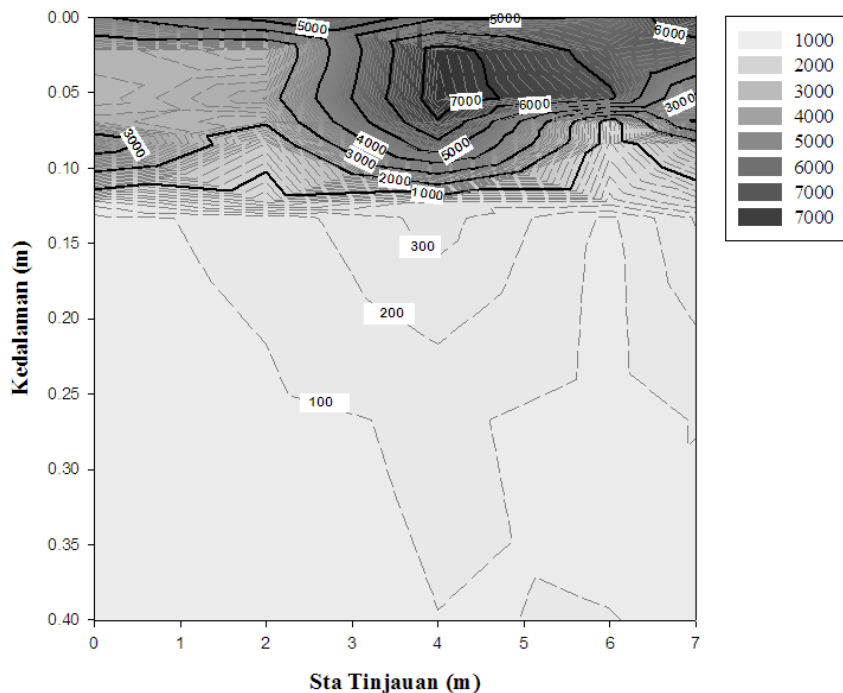
9.4 SISTEM TOMOGRAFI UNTUK PROFIL 2-D MODULUS ELASTISITAS

Pada bagian ini, ditunjukkan pengembangan teknik SASW yang digunakan untuk mendeteksi profil modulus elastisitas dalam 2 dimensi. Teknik ini menggunakan teknik tomografi untuk menghasilkan sistem *multi-channel tomography analysis of surface waves* (MTSW). Konsep utama teknik MTSW ini adalah profil modulus elastisitas dihitung berdasarkan nilai dari profil kecepatan gelombang geser 1-D. Seterusnya, beberapa profil 1-D modulus elastisitas digabungkan dan saling dikorelasikan dalam luasan pixel persegi untuk membangun citra 2-D kedalaman, panjang dan modulus elastisitas.

Profil tomografi ini diperolehi dari analisis susunan dua dimensi (*two dimensional array*). Dalam teknik ini, citra tomografi 2-D disusun dari suatu analisis pixel dengan resolusi 640×480 atau lebih. Input yang dimasukkan dalam analisis pixel adalah informasi

modulus elastisitas dan kedalaman. Satu kolom pencitraan mewakili satu profil 1-D. Satu pixel berisi nomor (nilai) modulus elastisitas dan masing-masing diberikan warna sesuai kategori spektrum warna. Analisis korelasi selanjutnya dilakukan pada setiap kolom untuk mengisi pixel antara kolom input.

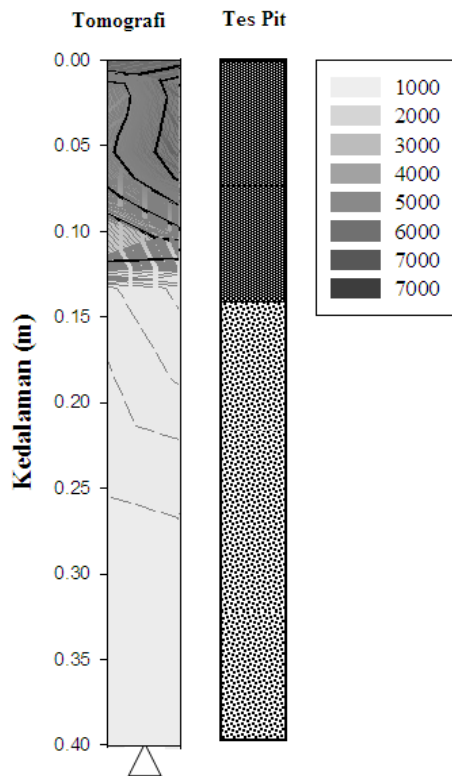
Gambar 9.22 menunjukkan hasil akhir profil 2-D dari analisis tomografi modulus elastisitas perkerasan jalan pada beberapa station (Sta 169+520 sampai dengan Sta 169+660) di Jalan Cagak, Subang, Jawa Barat. Dari hasil yang diperoleh dapat ditunjukkan bahwa teknik MTSW menghasilkan profil tomografi yang dapat menunjukkan anomali pada lapisan permukaan jalan seperti yang diperlihatkan pada Sta 169+560 (kedalaman 0 hingga 15 cm). Ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan kualitas material penyusun lapisan yang bisa diakibatkan oleh pemadatan yang tidak merata atau ketebalan lapisan yang beragam.



Gambar 9.22: Hasil analisis tomografi profil modulus elastisitas pada beberapa Sta di Jalan Cagak, Subang

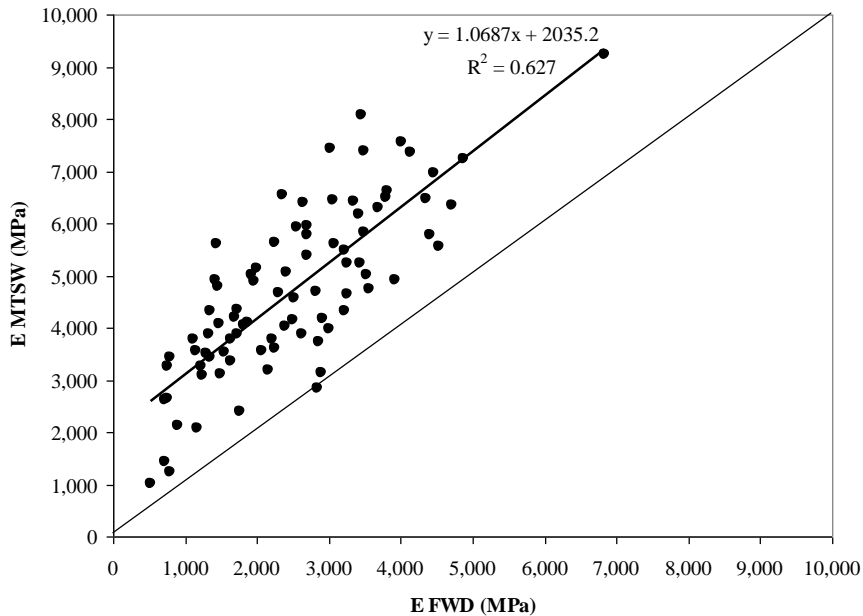
Sementara itu, untuk lapisan fondasi jalan ditunjukkan memiliki kualitas yang hampir seragam, demikian juga untuk lapisan tanah dasar pada kedalaman lebih daripada 35 cm (di bawah 500 MPa). Meskipun demikian, profil pada lapisan tanah dasar terlihat tidak terlalu detil karena klasifikasi spektrum yang digunakan dalam selisih 500 MPa (dengan spektrum maksimum 7000 MPa). Profil ini bisa diperbaiki dengan memisahkan antara lapisan permukaan dan lapisan fondasi-tanah dasar supaya klasifikasi spektrum tidak terlalu jauh dan lebih terperinci.

Pada Sta 165+560, dilakukan tes pit untuk mengetahui ketebalan lapisan yang sebenarnya. Hasil test pit menunjukkan bahwa lapisan permukaan ACWC sebesar 15 cm, lapisan Sirtu 27 cm dan selebihnya adalah tanah dasar (Gambar 9.23). Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.23 bahwa perbedaan antara lapisan permukaan hasil analisis MTSW ($T = 14,38$ cm) dan tes pit ($T = 15$ cm) diperoleh sebesar 0,62 cm atau 4,13 %.



Gambar 9.23: Perbandingan tebal perkerasan jalan dari profil hasil MTSW terhadap data kedalaman dari tes pit di Sta 165+560, Jalan Cagak

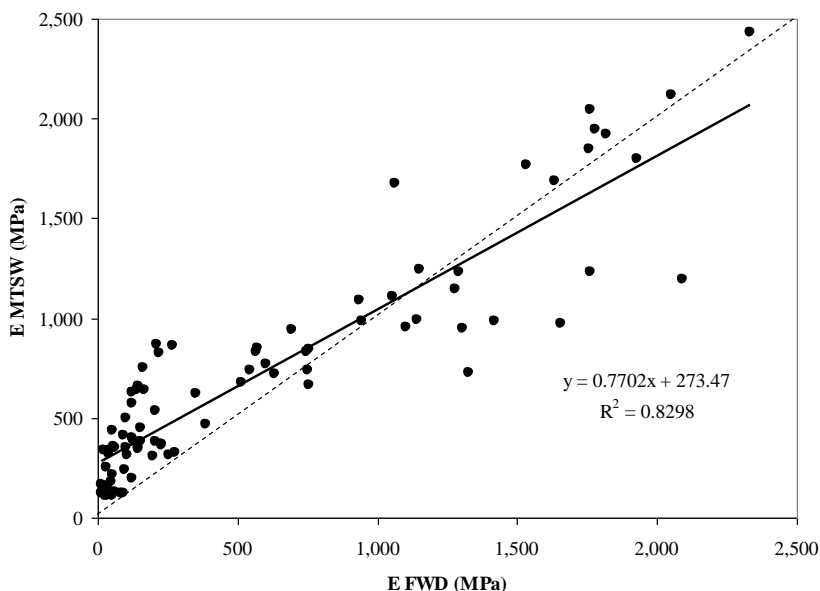
Gambar 9.24 menunjukkan salah satu contoh hasil analisis teknik MTSW pada 20 station (titik pengukuran) di Jalan Cagak, Subang Jawa Barat. Dari gambar dapat dilihat bahwa anomali lapisan perkerasan terlihat jelas dari titik pengukuran 5 hingga 10 (Sta 169 + 260 sampai dengan Sta 169 + 420), pada lapisan permukaan perkerasan jalan dan lapisan tanah dasar. Kemungkinan pada lapisan permukaan adalah lebih tebal dibandingkan lapisan lainnya. Hal ini konsisten dengan hasil tes pit pada titik pengukuran tersebut. Untuk lapisan tanah dasar, dapat diamati bahwa terdapat lapisan sedikit keras pada tanah dasar yang dimungkinkan merupakan lapisan batuan sedimen muda.



Gambar 9.25: Korelasi modulus elastisitas antara FWD dan MTSW untuk lapisan permukaan jalan

Dalam FWD, konsep beban impuls yang dihasilkan dari pemberat yang dijatuhkan (51 kN), secara teorinya akan menghasilkan respon defleksi yang sama dengan beban kendaraan. Bahan akan merespon tegangan yang dihasilkan oleh beban kendaraan pada regangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan reaksi gelombang yang digunakan dalam teknik MTSW. Dengan demikian, bahan akan berada dalam kondisi visko-elastik dengan respon non-linier (regangan tinggi). Bahan perkerasan diasumsikan tidak terjadi deformasi permanen akibat beban impuls.

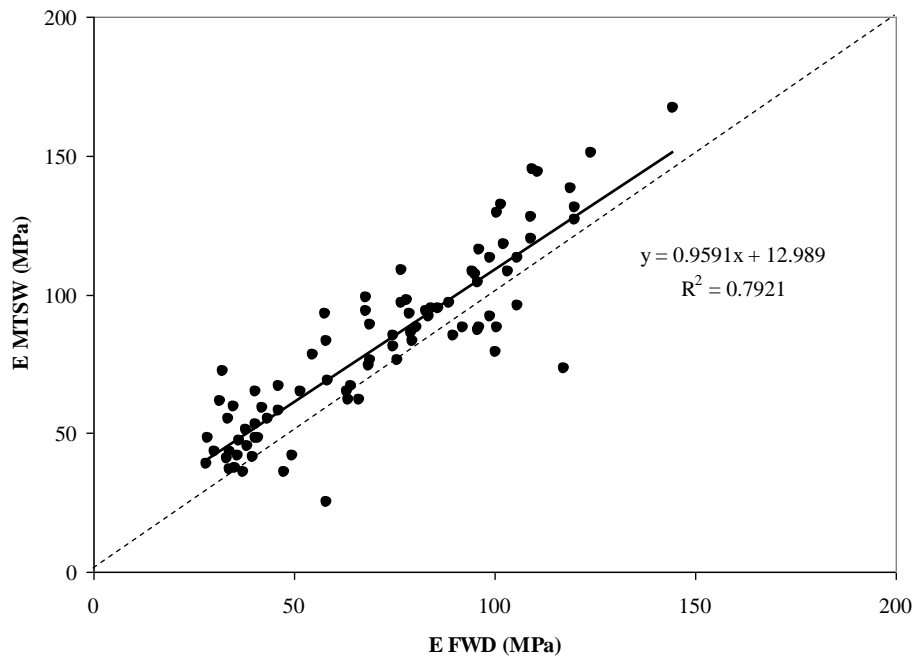
Gambar 9.26 menunjukkan korelasi modulus elastisitas antara FWD dan MTSW yang terjadi pada lapisan fondasi perkerasan jalan. Hasil korelasi menunjukkan hubungan parameter yang baik dengan koefisien determinasi sebesar 0,83. Meskipun demikian, pada beberapa titik pengukuran (di atas 1000 MPa), nilai modulus elastisitas FWD lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai modulus elastisitas MTSW.



Gambar 9.26: Korelasi modulus elastisitas antara FWD dan MTSW untuk lapisan fondasi perkerasan jalan

Keadaan tersebut berbeda dengan pendekatan teori tegangan-regangan dan konstitutif bahan, dimana semestinya nilai modulus elastisitas MTSW (berbasis perambatan gelombang) akan memiliki nilai yang relative lebih tinggi atau minimal sama. Anomali ini kemungkinan disebabkan oleh pemodelan 3 lapisan yang digunakan dalam analisis defleksi dalam metode perhitungan balik FWD. Untuk mengkaji lebih lanjut, perlu dilakukan perhitungan balik modulus elastisitas menggunakan model lapisan yang lebih besar misalnya 4 atau 5 lapisan.

Gambar 9.27 menjelaskan hubungan modulus elastisitas dari FWD dan MTSW untuk lapisan tanah dasar. Berbeda dengan lapisan permukaan, trend garis regresi untuk lapisan tanah dasar terlihat mendekati garis kesamaan atau *equality line*. Dengan koefisien determinasi sebesar 0,79, dapat disimpulkan bahwa hubungan antara modulus elastisitas hasil FWD dan MTSW adalah relatif sama.



Gambar 9.27: Korelasi modulus elastisitas antara FWD dan MTSW untuk lapisan tanah dasar perkerasan jalan

Berdasarkan teori tegangan-regangan, beban impuls yang dijatuhkan di permukaan jalan akan didistribusikan kepada lapisan yang berada di bawahnya dalam tegangan dengan luasan yang lebih besar. Sehingga, tegangan vertikal dan horizontal yang diterima oleh lapisan tanah dasar akan lebih kecil dibandingkan dengan lapisan permukaan dan fondasi. Dimungkinkan, tegangan yang kecil pada lapisan perkerasan jalan menghasilkan respon regangan yang nilainya hampir sama atau mendekati regangan akibat perambatan gelombang dalam teknik MTSW. Jika regangan dalam nilai yang sama maka dimungkinkan modulus elastisitas yang dihasilkan adalah relatif sama. Untuk mengesahkan hipotesis ini, kajian lanjut pemodelan FWD yang terkait dengan pengaruh distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan jalan terhadap nilai modulus elastisitasnya perlu dilakukan.

REFERENSI

- 01dB. 2001. Harmonie Measurement System. Getting Started Manual 32-Bit Version. France: 01dB Head office.
- Al-Hunaidi, M.O. 1992. Difficulties with phase unwrapping in spectral analysis of surface waves nondestructive testing of pavements. *Canadian Geotechnical Journal* 29: 506-511.
- Al-Shayea, N.A.R. 1994. Detection of subsurface cavities using the spectral-analysis-of-surface-waves method. Ph.D. Dissertation. The University of Michigan, Ann Arbor.
- Bloch, S. & Hales, A.L. 1968. New technique for teh determination of surface wave phase velocities. *Bulletin of Seismological Society of America* 58: 1021-1034.
- Bolt, B.B. 1976. Nuclear Explosions and Earthquake. San Fransisco: The Parted Veil. W.H. Freeman and Company.
- Brigham, E.O. 1974. The Fast Fourier Transform. Prentice-Hall, New York.
- Brüel & Kjær. 2006. System Data IDAe Hardware Configuration for PULSE - Types 3560-B, 3560-C, 3560-D and 3560-E.
- Cho, Y.S. & Lin, F.B. 2001. Spectral analysis of surface wave response of multi layer thin cement mortar slab structures with finite thickness. *NDT&E International* 34: 115-122.
- Cho, Y.S. 2002. NDT Response of spectral analysis of surface wave method to multi-layer thin high strength concrete structure. *Ultrasonic* 40: 227-230.
- Colombo, M. & Felicetti, R. 2007. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. *Fire Safety Journal* 42: 461-472.
- Cooley, J. W. & Tukey, J. W. 1965. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Math. Comput.* 19: 297-301.
- Curro, J.R. 1983. Cavity detection and delineation research. Technical Report GL-83-1. U.S. Army Waterways Experiment Station.
- Dravinsky, M. 1983. Ground motion amplification due to elastic inclusions in a half-space. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 11: 313-335.
- Ewing, W.M., Jardetzky, W.S. & Press, F. 1957. Elastic waves in layered media. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Foti, S. 2004. Using transfer function for estimating dissipative properties of soils from surface-wave data. *Near Surface Geophysics* 2: 231-240.
- Gucunski, N. 1991. Generation of low frequency Rayleigh wave for the spectral analysis of surface wave method. Ph.D. Dissertation. The University of Michigan, Ann Arbor.

- Gucunski, N. Ganji, V. & Maher, M.H. 1996. Effect of soil non homogeneity on SASW testing. Geotechnical Special Publication 58: 1083-1097.
- Gucunski, N., Krstic, V. & Maher, A. 2000. Field implementation of surface waves for obstacle detection (SWOD) method. Proc. of 15th World Conference Non Destructive Testing. <http://www.ndt.net/article/wcndt00.html> [15 Januari 2002].
- Haskell, N.A. 1953. The dispersion of surface waves in multi layered media. Bulletin of Seismology Society of America 43(1): 17-34.
- Haupt, A.W. 1977. Surface-waves in non homogeneous half-space. Proc. of the Conference on Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics. Vol. 1, pp. 335-367.
- Heisey, J.S., Stokoe, K.H. II, Hudson, W. R. & Meyer, A.H. 1982. Determination of in situ shear wave velocities from the spectral analysis of surface waves. Research Report 256-2. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Hiltunen, D.R. & Woods, R.D. 1988. SASW and crosshole test results compared. Proceedings of an ASCE Geotechnical Engineering Division Speciality Conference, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II-Recent Advances in Ground Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, pp.279-289.
- Joh, S.H. 1996. Advance in interpretation & analysis technique for spectral analysis of surface wave (SASW) measurements. Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin.
- Karl, J.H. 1989. An Introduction to Digital Signal Processing. London: Academic Press.
- Kausel, E. & Peek, R. 1982. Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution. Bulletin of the Seismological Society of America 72(5): 1459-1481.
- Kausel, E. & Rössset, J.M. 1981. Stiffness matrices for layered soils. Bulletin of the Seismological Society of America 71(6): 1743-1761.
- Kim, D.-S., Shin, M.-K. & Park H.-C. 2001. Evaluation of density in layer compaction using SASW method. Soil Dynamic & Earthquake Engineering 21 : 39-46.
- Kim, Y-H., Kim, D-H., Han, J-H. & Kim, C-G. 2007. Damage assessment in layered composites using spectral analysis and Lamb wave. Composites Part B: Engineering 38(7-8): 800-809.
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Kreyzig, E. 1993. Advanced Engineering Mathematics. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Madshus, C. & Westerdahl, H. 1990. Surface wave measurements for construction control and maintenance planning of roads and airfields. Proc.of 3rd. Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp. 233-243.
- Maryaningsih, N., Hermansyah O. & Savitri, M. 2014 Pengaruh Infrastruktur terhadap Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. Buletin Ekonomi Moneter dan Perbankan, Volume 17, Nomor 1, Juli 2014

- Matthews, M.C. Hope, V.S. & Clayton, C.R.I. 1996. The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods. Proc. of 30th Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society, pp. 1-13.
- McMechan G.A. & Yedlin M.J. 1981. Analysis of dispersive wave by wave field transformation. *Geophysics* 46: 869-874.
- Menke, W. 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. New York: Academic Press.
- Mera, R.F., Rössset, J.M. & Stokoe, K.H. 1991. Analytical study & inversion for the spectral analysis of surface waves method. Research Report 1175-3. Center of Transportation Research. Bureau of Engineering Research. The University of Texas at Austin.
- Miller, G.F. & Pursey, H. 1955. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. *Proc. R. Soc. Lond. A* (233), pp.55-69; DOI: 10.1098/rspa.1955.0245.
- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., dan Ivanov, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Leading Edge* 18: 1392-1396.
- Nazarian, S. & Desai, M.R. 1993. Automated surface wave method: field testing. *Journal of Geotechnical Engineering* 119: 1094-1111.
- Nazarian, S. & Stokoe, K. H. II. 1984. In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. Proc.of 8th World Conf. on Earthquake Engineering Vol.3, p. 31-38
- Nazarian, S. 1984. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave method. Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin.
- Nolet, G. & Panza, G.F. 1976. Array analysis of seismic surface waves: Limits and possibilities. *Pageoph* 114: 775 - 790.
- Norwood, J. Jr. 1979. *Intermediate classical mechanics*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Orozco, M.C. 2003. Inversion method for Spectral Analysis of Surface Waves (SASW). Ph.D. Dissertation. Georgia Institute of Technology.
- Park, C.B., Miller R.D. & Xia J. 1999a. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64(3): 800-808.
- Park, C.B., Miller, R.D. & Xia, J. 1999b. Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics* 64: 800 - 808.
- Park, C.B., Miller, R.D. & Xia, J. 1999c. Multimodal analysis of high frequency surface wave. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 99), Oakland, CA, March 14-18, pp. 115-122.
- Pilant, W.L. & Knopoff, L. 1970. Inversion of phase and group slowness dispersion. *J. Geophys. Res.* 75: 2135-2136.

- Richart, F.E., Jr., Woods, R.D. & Hall, J.R., Jr. 1970. *Vibrations of Soil and Foundations*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Rix, G.J. 1987. A source listing of DispGIPB, a program for the data reduction of SASW Measurements. Research Report. University of Texas at Austin.
- Rix, G.J., Bay, J.A. & Stokoe II, K.H. 1990. Assessing in situ stiffness of curing Portland cement concrete with seismic tests. *Transportation Research Record* 1284: 8-15.
- Rizzo, P., Debdhanit, Y., Kabara, J., Zadorozhny, V., Harries, K. & Tipper, D. 2007. Stress Wave-Based Bridge Monitoring System Using Wireless Sensor Networks. *Proceedings of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring*, Ed. F.-K. Chang, Stanford, CA, pp. 1255-1261.
- Rosyidi, S.A. 2004. Evaluation of the Dynamic Stiffness of Pavement Layers using SASW method. M.Sc Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A. 2009. Wavelet Analysis of Surface Wave for Evaluation of Soil Dynamic Properties. Ph.D. Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A. 2010. Contribution of Integrated Geophysical Surveys for Site Investigation in Seismic Hazards Analysis. *Proceeding of International Conference on Sustainable Built Environment*, Universitas Islam Indonesia.
- Rosyidi, S.A. 2012. Use of Wavelet Analysis and Filtration on Impulse Response for SASW Measurement in PCC Slab of Pavement Structure. *ASCE Geotechnical Special Publication* 215: 74-82.
- Rosyidi, S.A. 2013. Metode Analisis Gelombang Permukaan untuk Penyelidikan Sub-Permukaan. LP3M UMY, Yogyakarta, Indonesia.
- Rosyidi, S.A. 2015. Simultaneous in-situ stiffness and anomalies measurement on pavement subgrade using tomography surface waves technique. *Procedia Engineering* 125 (2015), Pages 534 - 540, DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.057.
- Rosyidi, S.A dan Ikhsan, J. 2005. Studi Simulasi Model 2 D dan 3 D Gelombang Rayleigh dalam Analisis SASW untuk Evaluasi Nilai Struktural Infrastruktur. Laporan Akhir Kompetisi Penelitian Dosen, LP3, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rosyidi, S.A. & Siegfried. 2009. Kinerja dan verifikasi terhadap modulus elastisitas tanah dasar dari pengukuran teknik seismik gelombang permukaan. *Jurnal Semesta Teknika* 13(1): 62-76.
- Rosyidi, S.A. & Taha, M.R. 2004. Measurement of Pavement Moduli using Simple Surface Wave Propagation Technique. *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi VII*, pp.1-10.
- Rosyidi, S.A. & Taha, M.R. 2012. Wavelet Spectrogram Analysis of Surface Wave Technique for Dynamic Soil Properties Measurement on Soft Marine Clay Site, *Seismic Waves - Research and Analysis*, Dr. Masaki Kanao (Eds.), InTech. DOI: 10.5772/27530. Retrieved from: <http://www.intechopen.com/books/seismic-waves-research-and>

analysis/wavelet-spectrogram-analysis-of-surface-wave-technique-for-dynamic-soil-properties-measurement-on-so

- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M., Taha, M.R. & Mustafa, M.M. 2002. Pengukuran sifat dinamik perkerasan lentur menggunakan metode Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (SASW). Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi V, pp.1-12.
- Rosyidi, S.A., Hantoro, G. & Taha, M.R. 2003 Determination the design input parameter of dynamic elastic modulus of road-pavement base layer using wave propagation technique. Prosiding Konferensi Teknik Jalan ke-7, pp. 1-12.
- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M. & Taha, M.R. 2004. Measurement of subgrade stiffness using the SASW method. Proc. of Malaysian Geotechnical Conference, Malaysia.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2005a. Predicting soil bearing capacity of pavement subgrade system using SASW method. Proc. International Symposium of Geoline 2005, pp.1-8.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2005b. Assessing in Situ Dynamic Stiffness of Pavement Layers with Simple Seismic Test. Proceeding of International Seminar and Exhibition on Road Constructions. Semarang, 26 May 2005, pp.15-24.
- Rosyidi, S.A., Hantoro, G., Siegfried, Handayani, G. dan Taha, M.R. 2007a. Pengembangan metode integrated-spectral-analysis-of-surface-waves (SASW) untuk evaluasi nilai modulus elastisitas struktur perkerasan jalan. Laporan Penelitian Hibah Bersaing, Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.
- Rosyidi, S.A. Taha, M.R., , A. Ismail dan Z. Chik, 2007b. Measurement of Seismic Parameter, Dynamic Shear Modulus and Bearing Capacity of Subgrade Layer on a Clayey Sandy Residual Soil. International Journal of Al-Azhar University Engineering (JAUES), Vol.2, No.3, April 2007: pp. 549 - 558.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R., Chik, Z. & Ismail, A. 2008. Determination of Attenuation and Geometric Damping on Clayey Sand Residual Soil in Irregular Profile using Surface Wave Method. Proceeding of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
- Rosyidi, S.A., Widiyanti, A. & Riyadi, S. 2016. Pembangunan Sistem dan Instrumentasi Pengukuran Kepadatan Tanah Dasar berbasis Gelombang Seismik. Laporan Penelitian PUPT. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kemenristekdikti.
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P. & Miller, R.D. 2004. Multimodal approach to seismic pavement testing. J Geotech Geoenviron Eng 130(6): 636-45.
- Schmitt, R. L., Faheem, A. & Imad L. Al-Qadi. 2013. Selection of Non-Destructive Testing Technologies for Asphalt Pavement Construction. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements.
- Shahin, M.Y. 1994. Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots. Chapman & Hall.

- Spang, A.W., Jr. 1995. In situ measurement of damping ratio using surface waves. Ph.D. Dissertation .The Georgia Institute of Technology.
- Spetzler, J., Trampert, J. & Snieder, R. 2002. The effect of scattering in surface wave tomography. *Geophys. J. Int.* 149: 755-767.
- Stokoe, K.H. II ,Wright, S.G., Bay, J.A. & Rössset, J.M. 1994a. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In Woods, R.D. (Ed). *Technical Review: Geophysical Characterization of Sites*, pp. 15-25. New Delhi : Oxford Publishers.
- Thompson, W.T. 1950. Transmission of elastic waves through a stratified solid medium. *Journal of Applied. Physics* 21: 89-93.
- Tokimatsu K. 1995. Geotechnical site characterisation using surface waves. *Proceedings of First Int. Conf. on Eartq. Geotechn. Eng.*, pp. 1333-1368.
- Tokimatsu K., Kuwayama S., Tamura S. & Miyadera Y. 1991. Vs determination from steady state Rayleigh Wave method. *Soils and Foundations* 31(2): 153-163.
- Trifunac, M.D., Hao, T.Y. & Todorovska M.I. 1999. On the reoccurrence of site specific response. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* 18 (8): 569-592.
- Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H. & Gokceoglu, C. 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. *Engineering Geology* 74 (3-4): 265-291
- Warta Anggaran, 2012. *Majalah Keuangan Sektor Publik*. Edisi 24 Tahun 2012.
- Weil, D.N. 2009. *Economic Growth*. Second Edition, Pearson Addison Wesley
- World Bank. 1994. *World Development Report: Infrastructure for Development*. Oxford University Press, New York
- World Economic Forum, 2011 *The Global Competitiveness Report 2011 - 2012*.
- Xia, J., Miller, R.D. & Park, C.B. 1999a. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave. *Geophysics* 64: 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A. & Harris, J.B. 1999b. Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 437-440.
- Xia, J., Xu, Y., Chen, C., Kaufmann, R.D. & Luo Y. 2006. Simple equations guide high-frequency surface-wave investigation techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26: 395-403.
- Yoon, S. 2005. Array-based measurements of surface wave dispersion and attenuation using frequency-wavenumber analysis. Ph.D. Dissertation. Georgia Institute of Technology.
- Yoshizawa, K. & Kennett, B.L.N. 2002. Determination of the influence zone for surface wave paths. *Geophys. J. Int.* 149: 440-453.

Zagyapan, M. & Fairfield, C.A. 2002. Continuous surface wave & impact methods of measuring the stiffness & density of railway ballast. *NDT&E International* 35: 75-81.

Zywicki, D. J. 1999. Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves. Ph.D. Dissertation. Georgia Institute of Technology.

INDEKS

A

akselerometer
akusisi
algoritma Cooley-Tukey
amplitudo
amplifier

B

beda fase
berat volume
bornitz
bessel

C

common mid point
common receiver mid point
common source-receiver
cross-power

D

damping
dashpot
derau
digital
diskrit
dispersif

E

elastik
energi

F

faktor kualitas
fase
fast fourier transform
forward problem
frekuensi
frekuensi natural
frekuensi resonan
fungsi absorpsi spesifik
fungsi perpindahan
fungsi perpindahan
fungsi potensial
fungsi skalar
forward modeling
FWD

G

gelombang
 gelombang geser
 gelombang love
 gelombang menerus
 gelombang primer
 gelombang rayleigh
 gelombang seismik
 gelombang sekunder

gelombang tubuh

gempa bumi
geofisika
geofon
geologi
geoteknik
getaran
gravitasi

H

harmonic
hankel
heaviside
hisapan viskos
hooke

I

impuls
insitu
inversi
IRF
isotropik
iterasi

K

kalibrator sensor
kecepatan fase
kehilangan gesekan
kelvin-voigt
kepadatan entropi
ketebalan
koefisien pengurangan
kolom resonan
konvergen
konfigurasi
konstanta elastik
konversi mode
kurva dispersi
kurva eksperimen

L

lapisan
luasan

M

magnitudo regangan
matrik kekakuan
matrik konstanta konstitutif
matrik kovarian
matrik sensitifitas
maximum likelihood
media berlapis
metode bandwidth setengah-daya
mode fundamen
mode gelombang

mode lebih tinggi
modulus
modulus elastik
modulus geser
modulus geser maksimum
MTSW
multi-sensor
N
nomor gelombang
navier
Nichols
nyquist
P
panjang gelombang
passband
penganalisis spektrum
penggetar mekanik
pengukuran lapangan
pengurangan logaritma
penyaringan respon impuls
penyelidikan tanah
perkerasan jalan
perpindahan partikel
plastisitas
piezoelektrik
profil 1-D
profil 2-D
profil model mula
profil tanah
R
rasio poisson
rasio redaman
rasio spektrum
redaman geometrik

refleksi
refraksi
regangan
rekaman waktu
respon tanah
RMS
S
SASW
sensor
signal to noise ratio
sinyal
sinyal gangguan
sistem padat linier standar
spektrum
spektrum auto
spektrum koheren
standard cone penetration test
steady-state
stopband
sub-permukaan
sumber gelombang
sumber harmonik aktif
superposisi gelombang
T
tanah lunak
tegangan
tomografi
transien
transitionband
V
vibrator
visko-elastik

TENTANG PENULIS



Sri Atmaja P. Rosyidi

Ir (PII)., ST.(UMY)., MSc.Eng.(UKM), Ph.D.(UKM), P.Eng, IPM (PII)
MIACMAG, M Inst of Engineers, Indonesia (PII), MISGE, MIRDA,
GreenShip Associate (GA)

Associate Professor, Department of Civil Engineering
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

SCOPUS ID Author : 26321207400
ORCID ID: orcid.org/0000-0001-8853-555X

Sri Atmaja P. Rosyidi, membidangi keahlian pada kajian-kajian dinamika material pada tanah dan perkerasan jalan, rekayasa perkerasan jalan, infrastruktur transportasi khususnya pada teknik penilaian dan evaluasi, rekayasa struktur jalan rel dan teknik NDT. Penulis mengawali karir akademiknya sebagai asisten dosen (1999), dosen muda (2000) hingga saat ini sebagai dosen senior (Lektor Kepala/Associate Professor) sejak tahun 2013 di Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY). Selain sebagai dosen, penulis juga aktif sebagai peneliti senior di Center for regional Energy Management (Pusat Studi Pengelolaan Energi Regional/PUSPER) UMY untuk bidang energi-lingkungan dan transportasi; dan penulis menjadi Direktur PUSPER (2010 – 2011; 2017 – saat ini). Saat ini, penulis menjadi Direktur Pascasarjana UMY, dan sebelumnya diberikan amanah sebagai Wakil Rektor bidang Kemahasiswaan, Alumni, Kerjasama dan Internasionalisasi di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta periode 2011 – 2013 dan 2013 – 2017. Menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik Sipil dengan predikat *Cum Laude* di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta pada 1999, penulis melanjutkan studinya di Department of Civil and Structural Engineering, the National University of Malaysia; dan menyelesaikan studinya MSc.Eng (Master of Science in Engineering) pada tahun 2004. Penulis juga menempuh pendidikan Postgraduate Certificate pada International School of Landslide Risk Analysis and Hazards Mitigation, University of Salerno, Italy di tahun 2008. Dan, di tahun 2009, penulis menyelesaikan pendidikan Ph.D. (Doctor of Philosophy) di Department of Civil and Structural Engineering, the National University of Malaysia. Pada tahun 2009 hingga 2011 penulis melanjutkan penelitiannya pada program Postdoctoral research, di GeoHazards and GeoEnvironment Research Group, the National University of Malaysia. Dalam bidang penelitian, penulis terlibat dalam lebih dari 40 penelitian yang didanai oleh Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY), Ministry of Public Works Indonesia, Ministry of National Education Indonesia; Ministry of Research and Technology Indonesia; Ministry of Research, Technology & Higher Education Indonesia; Ministry of Transportation Indonesia; Ministry of Science, Technology and Innovation Malaysia; Ministry of Foreign Affairs Netherlands (Agency of NL); European Commission dan Embassy of the Royal of the Netherlands. Penulis secara aktif mempresentasikan hasil-hasil studi dan penelitiannya pada seminar dan konferensi internasional; serta jurnal-jurnal bereputasi internasional.

Selain bidang akademik, penulis juga memegang sertifikat praktisi sebagai Professional Engineer dalam bidang Road (Pavement) and Bridge Engineer (2006); Building Construction Engineer (1999), GreenShip Associate Certificate for Greenbuilding (2016) dan Insinyur Profesional Madya dari Persatuan Insinyur Indonesia (PII). Penulis menerima penghargaan untuk penelitiannya diantaranya Bronze Medal in category of Innovation in Building – Architecture – Civil Engineering Construction –

Materials – Woodwork Category in Malaysian Technology Exhibition 2009; Bronze Medal in Malaysian Innovation and Research Expo and Competition 2004; Bronze Medal in Malaysian Technology Expo (2011), Ministry of Science, Technology and Innovation of Malaysia, 17-19 February 2011. Dari hasil penelitiannya, penulis mempunyai 1 patent terdaftar, 3 patent-pending, 2 trademarks dan 3 copyright.



Mohd. Raihan Taha

B.Eng. (UTM), MS (Maryland), Ph.D. (Louisiana)

Professor, Department of Civil & Structural Engineering
Universiti Kebangsaan Malaysia

SCOPUS ID Author : 3558690800
ORCID ID: 0000-0001-6719-9147

Professor Raihan, saat ini, menjabat sebagai Direktur Institut LESTARI Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), sejak Februari 2014. Sebelumnya, beliau adalah Ketua Jurusan pada Jurusan Teknik Sipil dan Struktur (Civil & Structural Engineering Department), Universiti Kebangsaan Malaysia selama 4 tahun. Prof. Raihan menyelesaikan pendidikan doktornya (PhD) dalam bidang teknik sipil dari The Louisiana State University, Baton Rouge, USA pada tahun 1996 dengan pengkhususan rekayasa geo-lingkungan (geoenvironmental engineering). Gelar S-2, Master of Science diperolehnya dari Maryland University, USA dan B.Eng. diperoleh dari UTM, Malaysia.

Keterarikan riset beliau dalam bidang geoteknik dan geo-lingkungan dimana beliau telah mempublikasikan makalahnya dalam beberapa topik-topik riset diantaranya mekanika tanah, dinamika tanah, metode-metode numerik dan analitik, model konsituf tanah, stabilisasi tanah, remediasi tanah, geo-lingkungan, penyelidikan tanah menggunakan metode seismik dan topik-topik geoteknik lainnya. Saat ini, yang menjadi fokus penelitian beliau adalah partikel nano untuk perbaikan tanah (soil improvement) dan pengurangan polutan lingkungan dalam tanah. Prof. Raihan juga terlibat dalam beberapa penelitian yang berkaitan dengan isu-isu pembangunan yang berkelanjutan. Prestasi bergensi internasional yang beliau raih adalah penghargaan British Royal Society Fellowship Award tahun 2006 dan Telford Prize tahun 2012 oleh The Institution of Civil Engineers, UK.



Nur Izzi Md. Yusoff

Ir. (IEM), BSc. (UKM), M.Eng (UTM), Ph.D. (Nottingham)

Senior Lecturer, Department of Civil & Structural Engineering
Universiti Kebangsaan Malaysia

SCOPUS ID Author : 36480701700
ORCID ID: orcid.org/0000-0003-4449-4981

Nur Izzati Md. Yusoff merupakan pengajar (dosen) senior di Department of Civil and Structural Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Malaysia. Beliau menyelesaikan Pendidikan BSc (Civil Engineering) dari Universiti Kebangsaan Malaysia pada tahun 2002, MEng. (Highway and Transportation Engineering) dari Universiti Teknologi Malaysia in 2005 dan PhD dari the University of Nottingham, United Kingdom pada tahun 2012. Dr. Nur Izzati merupakan anggota dan aktif dalam kegiatan beberapa asosiasi profesi dan keahlian diantaranya Transportation Science Society of Malaysia (TSSM), Board of Engineers, Malaysia (BEM), Road Engineering Association of Malaysia (REAM), Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA) dan Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Bidang penelitian yang diminatinya adalah rekayasa material perkerasan jalan, konstruksi jalan, desain perkerasan jalan dan keselamatan jalan (road safety).

Dr. Nur Izzati telah mempublikasikan lebih dari 100 makalah teknik dan membimbing lebih dari 30 mahasiswa pasca sarjana. Beliau juga aktif sebagai reviewer dan mitra bestari untuk lebih dari 100 makalah pada jurnal-jurnal internasional bereputasi diantaranya Construction and Building Materials (CBM), Road Materials and Pavement Design (RMPD), International Journal of Pavement Research and Technology (IJPRT), Materials and Design, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE Journal of Transportation Engineering dan International Journal of Pavement Engineering (IJPE). Dr. Nur Izzati juga menjadi anggota penyunting (editorial member) pada International Journal of Pavement Research and Technology (IJPRT). Saat ini, Dr. Nur Izzati sedang menjalankan kegiatan magang pada industry dan kegiatan profesional dengan konsultan teknik di Malaysia dimana beliau terlibat dalam proyek-proyek audit keselamatan jalan. Dari kegiatan profesinya ini, beliau telah menghasilkan lebih dari 100 buah laporan road safety audit di Malaysia.