

**LAPORAN TAHUNAN
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI**



**PENGEMBANGAN SISTEM DAN INSTRUMEN PENGUKUR DAYA
DUKUNG TANAH DASAR PERKERASAN JALAN BERBASIS
GELOMBANG SEISMIK**

Tahun ke-2 dari rencana 2 tahun

Ketua/Anggota Tim:

Sri Atmaja Putra J N N R, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.

NIDN : 0515047801

Slamet Riyadi, ST., M.Sc., Ph.D.

NIDN : 0509087801

Ir. Anita Widiанти, MT.

NIDN : 0020076502

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

DESEMBER 2016

**LAPORAN TAHUNAN
PENELITIAN UNGGULAN PERGURUAN TINGGI**



**PENGEMBANGAN SISTEM DAN INSTRUMEN PENGUKUR
DAYA DUKUNG TANAH DASAR PERKERASAN JALAN
BERBASIS GELOMBANG SEISMIK**

Tahun ke-2 dari rencana 2 tahun

Ketua/Anggota Tim:

Sri Atmaja Putra J N N R, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.

NIDN : 0515047801

Slamet Riyadi, ST., M.Sc., Ph.D.

NIDN : 0509087801

Ir. Anita Widianti, MT.

NIDN : 0020076502

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH YOGYAKARTA

DESEMBER 2016

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : PENGEMBANGAN SISTEM DAN INSTRUMEN
PENGUKUR DAYA DUKUNG TANAH DASAR
PERKERASAN JALAN BERBASIS GELOMBANG
SEISMIK

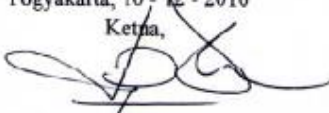
Peneliti/Pelaksana
Nama Lengkap : SRI ATMAJA PUTRA J N N R S.T., M.Sc.Eng, Ph.D
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
NIDN : 0515047801
Jabatan Fungsional : Lektor
Program Studi : Teknik Sipil
Nomor HP : 08157909887
Alamat surel (e-mail) : atmaja_sri@umy.ac.id


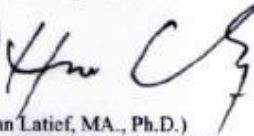
Anggota (1)
Nama Lengkap : SLAMET RIYADI Ph.D
NIDN : 0509087801
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Anggota (2)
Nama Lengkap : ANITA WIDIANTI
NIDN : 0020076502
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Institusi Mitra (jika ada) : -
Nama Institusi Mitra : -
Alamat : -
Penanggung Jawab : -
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 2 dari rencana 2 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp 75.000.000,00
Biaya Keseluruhan : Rp 150.000.000,00


Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

(Jazaul Khisan, ST., MT., Ph.D.)
NIP/NIK 19720524199804123037

Yogyakarta, 10 - 12 - 2016
Ketua,

(SRI ATMAJA PUTRA J N N R S.T.,
M.Sc.Eng, Ph.D)
NIP/NIK 9780415200004123046


Menyetujui,
Kepala Lembaga Penelitian

(Hilman Latief, MA., Ph.D.)
NIP/NIK 19750912200004113033

RINGKASAN

Permasalahan utama yang dihadapi dalam evaluasi perkerasan jalan di Indonesia yaitu pertama, bagaimana dapat menentukan sistem penilaian struktural bahan jalan, khususnya lapisan tanah dasar (subgrade) berupa parameter daya dukung secara efektif yang dapat dimonitor secara berkelanjutan. Kedua, adanya ketidakseimbangan antara ketersediaan dana dalam program pemeliharaan jalan dengan jumlah jaringan jalan di Indonesia yang harus dievaluasi. Ketiga, adanya keperluan mendesak untuk menciptakan suatu peralatan teknik evaluasi jalan yang inovatif, cepat dalam operasional, yang memiliki hasil akhir yang akurat dan sekaligus ekonomis.

Untuk itu, melanjutkan hasil penelitian di tahun pertama, dalam penelitian ini tahun kedua ini dibangun suatu sistem teknologi dan instrumentasi baru berupa instrumen pengukur daya dukung tanah perkerasan jalan yang bersifat tidak merusak (Non Destructive Testing, NDT) di lapangan (in-situ) yang berbasis perambatan gelombang seismik, yang selanjutnya instrumen ini diberi nama "In-Situ Portable Surface Waves Analyser (ISPSWA)". Teknologi NDT-ISPSWA yang akan diusulkan merupakan teknik pengujian lapangan untuk mengevaluasi nilai struktural lapisan tanah dasar perkerasan jalan secara tidak merusak, cepat, akurat dan ekonomis yang dapat digunakan di Indonesia. Teknik ini akan dibangun berdasarkan analisis perambatan gelombang seismik Rayleigh pada media yang berlapis yang dihasilkan dari sumber mekanik buatan.

Untuk membangun teknik NDT-ISPSWA ini diperlukan tahapan beberapa studi yang dibagi dalam tiga kerangka penelitian. Kerangka pertama telah dilakukan di tahun pertama penelitian yaitu dengan penyusunan sistem pengukuran daya dukung tanah berbasis kecepatan gelombang seismik di laboratorium. Sistem dasar yang dikembangkan ini menggunakan sistem spektrum berbasis transformasi Fourier. Gelombang seismik dirambatkan dalam sel sampel tanah dengan variasi kadar air-kepadatan dan daya dukung tanah yang berbeda. Variasi kecepatan gelombang seismik digunakan sebagai parameter eksperimen kepadatan-daya dukung tanah. Berbasis kajian eksperimen ini, sistem instrumen NDT-ISPSWA pada kerangka penelitian kedua (di tahun kedua ini) akan dikembangkan dengan membangun peralatan ukur kepadatan-daya dukung tanah dasar di lapangan. Penelitian dimulai dengan menyusun prototipe alat uji lapangan. Selanjutnya dilakukan kalibrasi alat uji dengan melakukan uji laboratorium skala 1:1 yang dikondisikan seperti kondisi tanah dasar pada perkerasan jalan di lapangan. Uji kalibrasi dan validasi sistem instrument ISPSWA seterusnya akan dilakukan untuk memperbaiki prototipe dan keakuratan pengujian. Akhirnya dalam kerangka penelitian ketiga, setelah pengembangan dan penyusunan instrument ISPSWA telah selesai dilakukan, alat ISPSWA diuji di lapangan. Hasil pengujian lapangan dibandingkan teknik SASW.

PRAKATA

Assalamu'alaikum Wr.Wb.,

Puji syukur dipanjatkan kehadiran Allah swt., dan sholawat serta salam semoga tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW., beserta keluarga serta sahabatnya.

Laporan penelitian ini adalah hasil penelitian yang didanai oleh Dibiayai oleh Kopertis Wilayah V DIY Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Nomor: Tertanggal 25 Maret 2015, NOMOR SP DIPA-023.04.1.673453/2015 tanggal 14 November 2014, melalui Penelitian Desentralisasi Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta Tahun Pendanaan 2015. Penelitian ini mengambil fokus penelitian mengenai pembangunan sistem dan instrumen "*Portable Surface Waves Analyser (PSWA)*" untuk evaluasi kepadatan tanah dasar jalan di Indonesia. Kajian ini merupakan topik penelitian utama yang dilakukan secara berkelanjutan dalam Roadmap Penelitian Kelompok Studi Teknik Transportasi, Program Studi S-1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY) mengenai pengembangan teknik seismik dalam bidang teknik sipil, khususnya untuk infrastruktur jalan dan jalan kereta api.

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini, diantaranya Dr. Hilman Latief, MA. selaku Ketua LP3M UMY, Siegfried, Ph.D. (Puslitbang Jalan dan Jembatan) yang telah banyak memberikan fasilitas dan kemudahan dalam peralatan dan analisis seismik serta kepada Muh. Lokot (Pimpro Lampung, Balai Kereta Api Sumatera Bagian Selatan) yang memberikan kemudahan dalam pengambilan data dan sampel di Lampung; Sumadi selaku laboran di Laboratorium UMY; para asisten: Fadlun, Budiarti, Silfiana Dewi dan Andri, sebagai Asisten Peneliti di Laboratorium Teknik Transportasi UMY; dan berbagai pihak yang membantu penelitian ini yang tidak dapat disebutkan seluruhnya di sini.

Penelitian ini merupakan kajian pengembangan dan aplikasi teknologi seismik dalam bidang jalan. Hasil ini diharapkan dapat dilanjutkan dengan penelitian tahun kedua untuk membuat instrumen lapangan PSWA. Teknologi ini merupakan teknik NDT baru dalam penilaian kekuatan struktur dalam manajemen infrastruktur jalan di Indonesia. Semoga kontribusi yang sederhana ini bisa memberikan manfaat. Amiin.

Wassalam,

Sri Atmaja P. Rosyidi
Slamet Riyadi
Anita Widianti

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Signifikansi Penelitian	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.3 Luaran Penelitian	6
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pengujian Bahan Berbasis Gelombang Seismik	6
2.2 Evaluasi Perkerasan Jalan Berbasis Gelombang Seismik	7
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	11
3.1 Tujuan Penelitian	11
3.2 Manfaat Penelitian	11
BAB IV. METODE PENELITIAN	12
4.1 Pembangunan Sistem dan Disain Prototipe ISPSWA	14
4.2 Pembangunan Instrumen ISPSWA dan Kalibrasi Alat	17
4.3 Pengukuran Lapangan Pembanding dan Pembangunan Model Empirik	21
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	23
5.1 Pembangunan Sistem Pengukur Cepat Rambat Gelombang Lapangan	23
5.2 Disain Sistem Pengukur Cepat Rambat Gelombang Lapangan	27
5.3 Respon Seismik Hasil Pengukuran pada Tanah Uji	35
5.4 Hasil Analisis Kecepatan Gelombang Fase dengan Variasi Kadar Air dan Kepadatan Tanah	41

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	46
7.1 Kesimpulan	46
7.2 Saran	46
 DAFTAR PUSTAKA	 48
 LAMPIRAN	
- Instrumen	
- Personalia tenaga peneliti beserta kualifikasinya	
- HKI dan publikasi	

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1	Hasil analisis pengukuran seismik (VR, VP dan VS) pada sampel uji variasi 25, 30, 35 dan 40 %	42
-----------	--	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Peta jalan penelitian dan pengembangan teknologi NDT berbasis perambatan gelombang seismik	10
Gambar 4.1.	Kerangka global penelitian yang diusulkan	12
Gambar 4.2.	Bagan alir tahap penelitian tahun pertama: pembangunan sistem dan instrumen pengukur cepat rambat gelombang di laboratorium	13
Gambar 4.3.	Skema umum prototype sistem instrumentasi ISPSWA	16
Gambar 4.4.	Skema umum alur penyusunan prototype sistem instrumentasi ISPSWA	16
Gambar 4.5.	Disain sistem instrumentasi multi-sensor ISPSWA Lapangan	17
Gambar 4.6.	Contoh bagian-bagian geofon	18
Gambar 4.7.	Penguat non-inverting	19
Gambar 4.8.	Rangkaian penguat instrumentasi menggunakan AD620	19
Gambar 4.9.	Program data akuisisi terhadap 4 sensor	20
Gambar 4.10.	Alur eksperimen dalam tahapan pengujian pembandingan dan pembangunan model empirik	22
Gambar 5.1.	Rangkaian instrument ADC, sensor penerima gelombang dan penganalisis data yang digunakan dalam penelitian ini	25
Gambar 5.2.	Disain alat dropped weight sebagai sumber gelombang pada instrument ISPSWA	26
Gambar 5.3.	Disain lengkap DW pada alat ISPSWA	27
Gambar 5.4.	Pola rekaman data seismik pada sampel tanah	36
Gambar 5.5.	Detil pola rekaman data seismik pada sampel tanah yang menunjukkan amplitudo gelombang Rayleigh	36
Gambar 5.6.	Diagram alir proses FFT untuk tampilan spectrum	37
Gambar 5.7.	Tampilan spektrum real-imaginary hasil analisis FFT untuk pengukuran sampel tanah	38
Gambar 5.8.	Data seismik tanah uji dan penentuan waktu kedatangan gelombang R pada sensor pertama dan kedua	40
Gambar 5.9.	Kurva dispersi kecepatan gelombang fase untuk sampel uji	41
Gambar 5.10.	Hubungan antara kecepatan gelombang fase pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air	42
Gambar 5.11.	Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh P dan S pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air	43
Gambar 5.12.	Hubungan antara kecepatan gelombang permukaan pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air	44
Gambar 5.13.	Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh P pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air	44

Gambar 5.14 Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh S pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air

45

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I :INSTRUMEN DUKUNGAN PADA PELAKSANAAN
PENELITIAN

LAMPIRAN II: ORGANISASI PENELITI

LAMPIRAN III: BIODATA

LAMPIRAN IV: PUBLIKASI DAN HAKI

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam manajemen perkerasan jalan, permasalahan klasik yang sering dijumpai adalah backlog (daftar tunggu) program pemeliharaan jalan, yang disebabkan adanya ketidakseimbangan antara besaran alokasi dana yang disediakan untuk kegiatan evaluasi dan pemeliharaan jalan terhadap luasnya jaringan jalan yang ada. Meskipun alokasi dana pemeliharaan infrastruktur dalam APBN untuk sektor jalan sudah mengalami peningkatan dari tahun ke tahun namun jika dibandingkan dengan total panjang jalan yang harus ditangani, alokasi dana program pemeliharaan jalan tidak dapat mencukupi kebutuhan pemeliharaan. 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 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.

Dalam bidang prasarana jalan raya ini, Indonesia masih tertinggal dari negara lain. Data yang dipublikasikan oleh *World Economic Forum* (WEF) pada 2011 menunjukkan bahawa 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.

Dalam pengembangan teknologi pemeliharaan jalan, tahapan yang paling penting dalam RMS adalah suatu sistem yang mampu mengukur kondisi jalan saat ini dan memprediksi depresiasi kekuatannya di masa yang akan datang (Rosyidi, 2005). Proses dalam tahapan tersebut yang dilakukan bertujuan untuk pengawasan dan penjaminan kualitas struktur yang lebih ekonomis. Untuk mengetahui kapasitas kekuatan struktur suatu perkerasan jalan memerlukan pengukuran nilai struktural setiap ketebalan lapisannya secara akurat, yang salah satunya adalah mengetahui perubahan daya dukung tanah dasar dan menentukan kepadatan tanah terpasang. Parameter tersebut digunakan untuk menentukan kapasitas beban yang dapat dilayani dan juga untuk pemilihan serta perancangan sistem rehabilitasi yang tepat.

Beberapa metode telah dikembangkan untuk menilai kondisi struktur perkerasan yang sesuai jenis pengujiannya dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu pengujian merusak (*destructive testing*, DT) dan pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing*, NDT). Keunggulan penggunaan NDT dalam sistem manajemen perkerasan adalah suatu pengujian yang tidak memberikan kerusakan terhadap struktur jalan, cepat, ekonomis dan tidak mengganggu pergerakan lalu lintas. Salah satu NDT yang berdasarkan pada pemanfaatan gelombang permukaan Rayleigh yang dikenal sebagai metode analisis gelombang permukaan (Nazarian & Stokoe, 1984). 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 (Rosyidi dkk. (2002, 2003, 2004a, 2004b, 2005, 2008, 2009, 2012), Rosyidi (2004, 2005, 2007, 2009, 2012). Rosyidi (2015) telah memperkenalkan teknologi tomografi yang dihasilkan dari teknik seismik dimana daya dukung tanah dasar perkerasan jalan dan anomalnya dapat dikenali dengan mudah dan akurat. Tambah lagi, dari pengujian empirik yang dilakukan oleh Rosyidi dkk. (2015), didapati suatu hubungan 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 monitoring kualitas perkerasan jalan di Indonesia. Hal ini yang selanjutnya menjadi fokus dalam penelitian ini yaitu mengembangkan sistem dan instrumen pengujian seismik untuk mendapatkan kondisi struktural (kepadatan dan daya dukung) tanah dasar yang dapat langsung diperoleh dari pengukuran lapangan dan tanpa merusak/*non-destructive testing* (NDT).

1.2 Signifikansi Penelitian

Ketika jaringan jalan sudah semakin luas dan mempertimbangkan faktor ekonomi dan biaya pemeliharannya yang semakin mahal, maka diperlukan suatu sistem manajemen manajemen jalan yang mampu mengevaluasi konstruksi secara baik dari tahap penilaian hingga rehabilitasi, dengan tujuan supaya jalan memiliki umur layanan yang lebih lama. Selain itu, masalah klasik, iklim tropis dengan curah hujan tinggi di Indonesia yang menyebabkan sebagian besar perkerasan jalan yang dibangun di atas permukaan tanah ekspansif akan cepat mengalami kerusakan. Monitoring terhadap daya dukung lapisan tanah dasar secara berkelanjutan menjadi salah satu faktor penting dalam pemeliharaan jalan. Untuk itu, perlu mencari upaya-upaya terobosan teknologi pemeliharaan jalan di Indonesia yang inovatif, ekonomis, akurat dan mudah dalam pelaksanaannya. Salah satu teknologi termaju saat ini yang dimiliki oleh Indonesia dalam penilaian kekuatan struktur jalan raya adalah alat uji Falling Weight Deflectometer (FWD). Alat FWD ini merupakan instrumen pengujian lapangan yang bersifat tidak merusak jalan, bekerja cepat dan memberikan output hasil nilai modulus elastisitas setaip lapisan jalan. Meskipun demikian, peralatan FWD ini sangat mahal harganya dan Kementerian Pekerjaan Umum hanya memiliki peralatan FWD sejumlah 4 buah, sehingga sangat tidak dimungkinkan untuk melayani keseluruhan jaringan jalan di Indonesia. Selain itu, aplikasi untuk analisis data FWD yang digunakan untuk intepretasi hasil akhir masih menunjukkan deviasi yang cukup besar. Ini disebabkan oleh model yang digunakan merupakan pengembangan kondisi lingkungan yang berbeda dengan kondisi di Indonesia dan model defleksi yang dikembangkan masih berlandaskan teori analisis defleksi statik, padahal kondisi yang perlu diperhitungkan adalah respon defleksi dinamik.

Melihat dari aspek ini, maka diperlukan pengembangan teknologi pemeliharaan jalan yang lebih representatif yang mampu menjadi alternatif dari pengujian FWD. Penelitian yang diusulkan ini adalah pengembangan teknik gelombang permukaan untuk evaluasi jaringan jalan di Indonesia. Teknik gelombang

seismik memiliki berpotensi untuk dikembangkan dengan pertimbangan instrumen pengujian yang relatif lebih sederhana (lebih ekonomis daripada FWD) dan juga, teknik ini dikembangkan menggunakan model dinamis berbasis perambatan gelombang permukaan dengan menghasilkan parameter dinamik bahan yang lebih mendekati kepada kondisi nilai modulus elastisitas sebenarnya.

Dari penelitian ini diharapkan akan menghasilkan sistem dan instrumentasi analisis gelombang permukaan portabel (*in situ portable-surface waves analyser*, ISPSWA) yang dapat diterapkan secara langsung untuk proses evaluasi struktur lapisan tanah dasar perkerasan jalan di Indonesia khususnya oleh pihak pemerintah dalam hal ini Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum yang bertanggung jawab untuk pemeliharaan jaringan jalan nasional dan Pemerintah Daerah yang memiliki otoritas pemeliharaan jalan provinsi dan kabupaten. Mengingat aspek ekonomis dan pengadaaan peralatannya yang lebih murah dibandingkan alat NDT lainnya, metode ISPSWA yang diusulkan dalam penelitian ini, diharapkan juga dapat menjadi alternatif metode evaluasi perkerasan jalan.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem dan instrumentasi teknologi berbasis gelombang permukaan untuk menentukan daya dukung lapisan tanah dasar perkerasan jalan dengan sifat pengujian yang tidak merusak, efisien dan dapat menjawab permasalahan pemeliharaan jaringan jalan tentang monitoring nilai struktural jalan yang berkelanjutan. Penelitian ini terfokus pada pembangunan sistem dan instrumentasi pengujian lapangan *In-Situ Portable Surface Waves Analysis* (ISPSWA) sebagai alat uji lapangan untuk mengukur nilai struktur kepadatan dan daya dukung tanah pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan berbasis kecepatan gelombang seismik. Tujuan khusus penelitian ini dijelaskan secara terperinci sebagai berikut:

1. membangun sistem dan prototipe *In-Situ Portable Surface Waves Analysis* (ISPSWA) lapangan untuk evaluasi kepadatan dan daya dukung tanah dasar perkerasan jalan,
2. membangun instrumen ISPSWA hasil kalibrasi menjadi peralatan uji lapangan,
3. melakukan verifikasi hasil dengan pengukuran langsung ISPSWA di lapangan dan membandingkan hasilnya dengan hasil pengukuran teknik SASW.

1.4 Luaran Penelitian

Dari penelitian ini dihasilkan keluaran berupa sistem dan instrumentasi analisis gelombang permukaan portabel lapangan (*in-situ portable-surface waves analyser*, ISPSWA) yang belum dilakukan oleh penelitian sebelumnya. Dengan demikian, direncanakan luaran penelitian ini adalah prototipe alat/instrumen ISPSWA, Hak Paten/HaKI, makalah jurnal dan konferensi internasional untuk sistem dan pengukuran cepat rambat gelombang untuk tanah dasar di lapangan yang dihasilkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengujian Bahan Berbasis Gelombang Seismik

Ketika suatu beban getaran diletakkan di atas permukaan media, perambatan gelombang Rayleigh (R) yang dihasilkan memiliki 67 % daripada seluruh tenaga mekanik yang dikeluarkan (Nazarian, 1984). Oleh karena itu, gelombang R merupakan parameter yang berpotensi bagi pengukuran sifat bahan yang menggunakan asas perambatan gelombang. Energi dari suatu sumber gelombang permukaan Rayleigh akan bergerak sepanjang permukaan dan amplitudonya akan berkurang secara cepat sesuai kedalaman. Pergerakan gelombang Rayleigh akan berlaku secara menyebar (*dispersion*) yang merupakan suatu fenomena dari fungsi kecepatan gelombang terhadap panjang gelombang dan frekuensinya. Panjang gelombang pendek dengan frekuensi tinggi hanya merambat pada permukaan yang dangkal, sedangkan gelombang yang lebih panjang dengan frekuensi rendah dapat merambat lebih dalam.

Aplikasinya yang pertama telah dilakukan oleh Nazarian (1984) dan Nazarian & Stokoe (1984) yang menjelaskan penggunaan analisis gelombang permukaan untuk menentukan kekakuan tanah dan struktur timbunan jalan di Texas, USA. Meskipun demikian, teknik tersebut masih menggunakan algoritma analisis yang sederhana sehingga proses inversi profil kekakuan bahan masih sederhana yang belum merepresentasikan profil kedalaman yang detail.

Penelitian lain mengenai penggunaan teknik SASW telah didapati berhasil untuk beberapa pengujian empiris lapangan, seperti studi karakteristik berbagai fondasi bangunan yang dilakukan oleh 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 studi menunjukkan nilai korelasi perbandingan yang baik. Penilaian nilai modulus dinamik struktur beton menggunakan metode SASW dilakukan oleh Rix dkk. (1990) dan Cho (2002), dan dilanjutkan dengan studi pengembangan dengan pendeteksian tebal dan parameter dinamis lapisan pada struktur motar semen oleh Cho dkk. (2001). Kim dkk. (2001) melakukan studi

pengukuran tingkat pemadatan tanah menggunakan spektrum gelombang. Studi yang dilakukan menerbitkan suatu korelasi empiris antara kecepatan gelombang geser (V_s) dan kepadatan kering tanah. Studi penggunaan spektrum gelombang permukaan pada struktur balas jalan kereta api dilakukan oleh Zagyapan dkk. (2002). Pada perkembangannya, penggunaan analisis spektrum gelombang permukaan telah diperluas untuk mendeteksi anomali pada berbagai struktur sub-permukaan oleh Gucunski dkk. (1996, 2000).

2.2 Evaluasi Perkerasan Jalan Berbasis Gelombang Seismik

2.2.1. Hasil-Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengembangan teknik gelombang permukaan untuk evaluasi jalan khususnya untuk perkerasan dan struktur tanah yang dipengaruhi oleh iklim wilayah tropis selanjutnya dilaksanakan oleh peneliti sejak tahun 2002 dengan ringkasan hasil penelitian diberikan berikut ini.

Rosyidi dkk. (2002, 2003, 2004a,b, 2005, 2007a,b), dan Rosyidi (2004, 2005) telah melakukan pengujian empiris metode analisis gelombang permukaan pada berbagai tipe jalan dan lokasi yang berbeda di beberapa wilayah di Indonesia. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa untuk kajian analisis gelombang permukaan pada profil berlapis dengan perbedaan nilai kekakuan yang tidak ekstrim, inversi sederhana dan model perambatan gelombang dengan model *wave-plate* dapat digunakan untuk membangun kurva penyebaran gelombang fase terhadap frekuensi dengan baik (representatif). Di sisi lain, Rosyidi (2004, 2005, 2007) menemukan bahwa untuk menjalankan pengujian metode analisis gelombang permukaan di perkerasan jalan masih terdapat berbagai kesulitan terutama memastikan mode perambatan gelombang Rayleigh sehingga rekomendasi yang diberikan oleh Rosyidi (2005) adalah diperlukannya studi lanjutan berupa simulasi pemodelan dan penyempurnaan perumusan algoritma bagi memperoleh bentuk-bentuk mode perambatan gelombang yang nyata, dengan demikian dapat membantu dalam proses analisis data seismik. Kekeliruan dalam interpretasi mode gelombang R yang bergerak di suatu profil uji akan berpengaruh pada tingkat keberhasilan pada proses inversi (*inversion process*) kurva dispersi kecepatan gelombang geser. Proses tersebut bertumpu pada interpretasi dan pemisahan kecepatan gelombang fase kelompok (*group velocity*) menjadi kelompok gelombang fase (*phase velocity*) yang mewakili gelombang Rayleigh.

Rosyidi (2007) melakukan penelitian dengan melibatkan algoritma matrik kekakuan dinamik 2 D dan 3 D untuk mempelajari pola mode gelombang pada struktur jalan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pengaruh pencampuran gelombang mekanik dapat didekati dengan pemodelan 3 D, dimana model ini dianalisis lebih nyata dibandingkan pendekatan 2 D. Penelitian ini menyelesaikan kendala terutama terkait dengan belum dapat dibedakannya antara kecepatan kelompok (*group velocity*) dan kecepatan fase (*phase velocity*) dalam investigasi perambatan gelombang pada struktur jalan. Hasil penelitian Rosyidi (2007) memberikan kontribusi dengan ditemukannya variasi mode gelombang yang dipengaruhi oleh gelombang mekanik tubuh dan permukaan pada model jalan.

Penelitian lanjutan penggunaan teknik analisis gelombang permukaan untuk manajemen perkerasan jalan dilakukan oleh Rosyidi dkk. (2007a) yang mengemukakan bahwa faktor penentu lain dalam keberhasilan analisis gelombang permukaan 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, penelitian ini diteruskan oleh Rosyidi dkk. (2008), Rosyidi (2009) yang mengusulkan metode transformasi wavelet untuk menyelesaikan permasalahan teknik analisis mode gelombang dalam metode SASW.

Dalam perkembangannya, Rosyidi dkk. (2007a,b, 2008) telah mengusulkan suatu teknik integrated-SASW untuk 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. Berdasarkan kajian terbaru yang dilakukan oleh Rosyidi dan Siegfried (2010), teknik gelombang seismik dilanjutkan dengan penyusunan sistem multi-channel gelombang permukaan untuk evaluasi bahan jalan dan anomali struktur jalan.

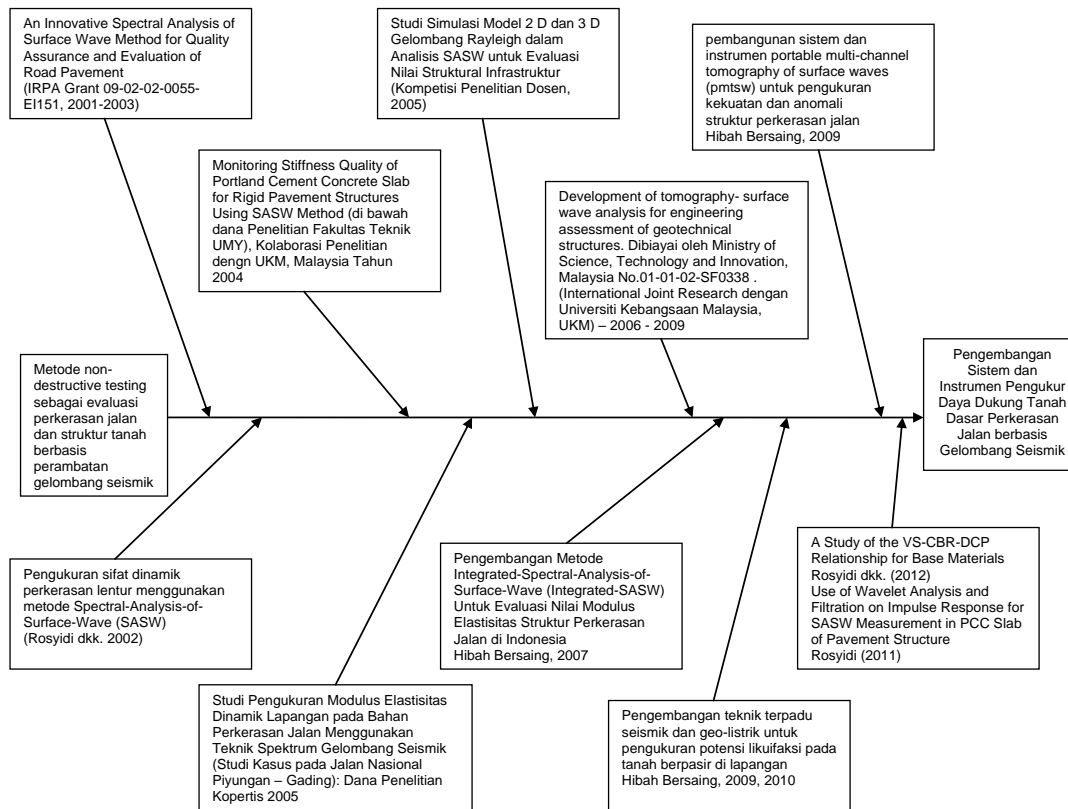
Rosyidi dkk. (2009) mengusulkan algoritma transformasi wavelet berbasis Gaussian untuk mendapatkan spektrum analisis yang lebih baik untuk data non-stationary acak yang bisa diperoleh dalam pengujian di perkerasan jalan. Hasil penelitiannya memberikan kontribusi terhadap pembangunan sistem analisis perbedaan fase dan spektrum fase yang lebih tepat.

Rosyidi (2012) melanjutkan rekomendasi dari penelitian Rosyidi dkk (2009) untuk diaplikasikan pada struktur perkerasan kaku. Model perkerasan kaku dibangun

dengan menggunakan nilai kuat tekan beton yang berbeda. Kajian tersebut menunjukkan bahwa teknik wavelet dapat digunakan untuk mendeteksi respon impuls dalam teknik analisis gelombang permukaan. Suatu persamaan empiris dari kajian ini menunjukkan korelasi yang baik dengan model ACI untuk penentuan kuat tekan beton berdasarkan kecepatan gelombang seismik. Selain untuk analisis perkerasan jalan, Rosyidi (2010) telah mengaplikasikan metode analisis spektrum gelombang permukaan dan geo-resistivity untuk menghasilkan profil 2-D potensi likuifaksi pada tanah deposit pasir di kawasan kampus UMY. Lanjut lagi, Rosyidi dkk. (2012) telah merekomendasikan beberapa persamaan empiris kecepatan gelombang geser dan nilai CBR lapangan untuk bahan granular (berbutir) agregat perkerasan jalan untuk evaluasi bahan perkerasan jalan.

2.2.2 Road Map Penelitian

Peta jalan penelitian dan pengembangan teknologi NDT berbasis seismik sebagai teknologi pengujian perkerasan jalan yang ramah lingkungan, ekonomi, inovatif dan berkelanjutan diberikan dalam Gambar 2.1. Peralatan seismik untuk teknologi pemeliharaan jalan termasuk dalam pengembangan yang baru. Belum digunakannya teknik ini karena masih perlu dikembangkan turunan teknologi seismik yang mudah dalam aplikasinya dan perlu disediakannya perangkat yang sederhana. Peta jalan penelitian teknologi seismik untuk aplikasi jalan ini telah dilakukan berawal dari studi untuk mengenali potensi seismik untuk evaluasi bahan dari tahun 2002 hingga 2007. Seterusnya dikembangkan sistem analisis Fourier dan Wavelets dan sistem tomografi dalam analisis seismik untuk pengujian kekuatan tanah dan jalan dari tahun 2009 hingga 2012. Beberapa studi yang telah dilakukan tersebut menunjukkan pentingnya pembangunan instrumen dan peralatan yang sederhana untuk melakukan untuk mengenali daya dukung tanah dan kepadatan. Daya dukung tanah dan kepadatan merupakan parameter penting dalam penilaian kualitas jalan dan hingga saat ini kedua parameter hanya mampu dievaluasi dengan peralatan terpisah dan sebagian besar dilaksanakan di laboratorium dengan pengambilan sampel. Isu ini yang menjadi fokus penelitian yang dalam penelitian PUPT ini.



Gambar 2.1.Peta jalan penelitian dan pengembangan teknologi NDT berbasis perambatan gelombang seismik

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem dan instrumentasi teknologi berbasis gelombang permukaan untuk menentukan daya dukung lapisan tanah dasar perkerasan jalan dengan sifat pengujian yang tidak merusak, efisien dan dapat menjawab permasalahan pemeliharaan jaringan jalan tentang monitoring nilai struktural jalan yang berkelanjutan. Penelitian ini terfokus pada pembangunan sistem dan instrumentasi Portable Surface Waves Analysis (PSWA) sebagai alat uji di laboratorium dan lapangan untuk menghasilkan nilai daya dukung tanah berbasis kecepatan gelombang seismik. Tujuan khusus penelitian ini untuk setiap tahapan penelitian ini dijelaskan secara terperinci sebagai berikut:

1. membangun sistem dan prototipe *In-Situ Portable Surface Waves Analysis* (ISPSWA) lapangan untuk evaluasi kepadatan dan daya dukung tanah dasar perkerasan jalan,
2. membangun instrumen ISPSWA hasil kalibrasi menjadi peralatan uji lapangan,
3. melakukan verifikasi hasil dengan pengukuran langsung ISPSWA di lapangan dan membandingkan hasilnya dengan hasil pengukuran teknik SASW.

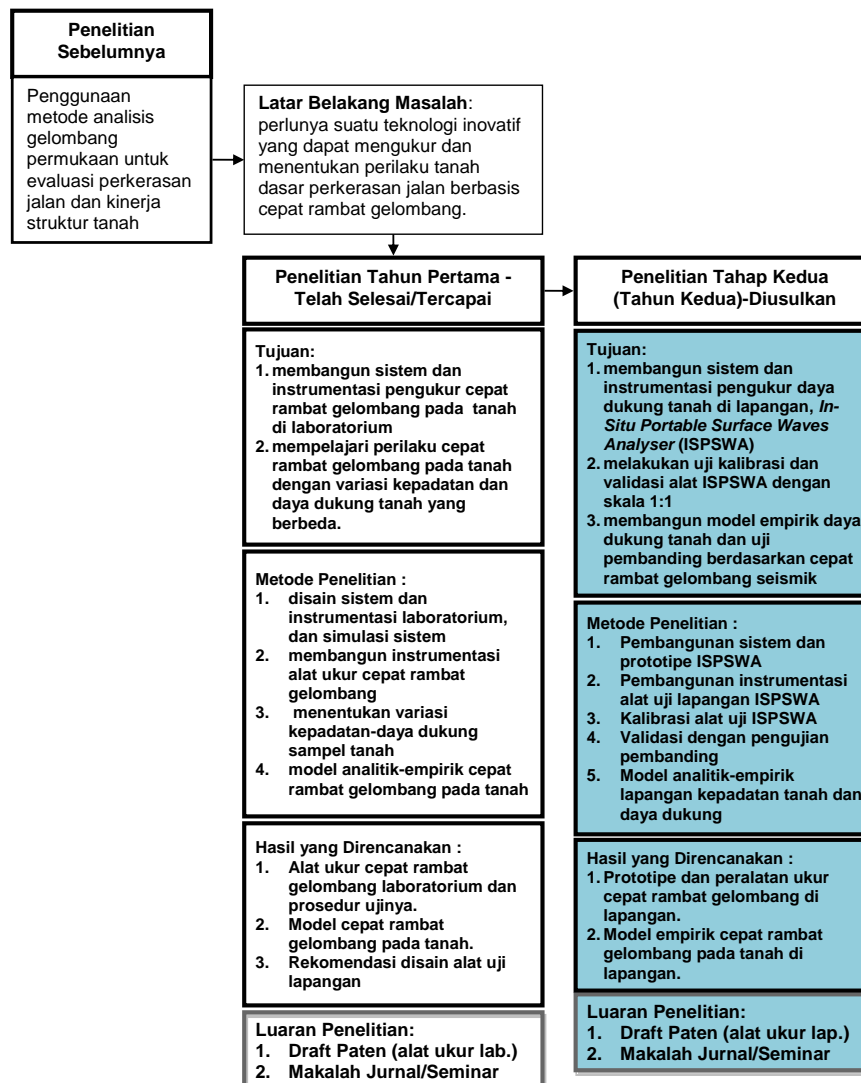
3.2 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini, adalah menghasilkan teknik dan instrumen evaluator NDT (non destructive testing) baru berupa teknik PSWA yang dapat diterapkan secara langsung untuk proses evaluasi struktur perkerasan jalan di Indonesia khususnya oleh pihak pemerintah dalam hal ini Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum yang bertanggung jawab untuk jaringan jalan nasional dan Pemerintah Daerah yang memiliki otoritas pengembangan dan pemeliharaan jalan propinsi dan kabupaten. Mengingat aspek ekonomis dan pengadaan peralatannya yang lebih mudah (karena dibuat sendiri) dan memiliki keakuratan yang lebih baik untuk pengujian lapangan, teknik ini diharapkan juga dapat menjadi alternatif metode evaluasi perkerasan jalan selain penggunaan FWD untuk memenuhi kebutuhan pemeliharaan jaringan jalan di Indonesia.

BAB IV

METODE PENELITIAN

Untuk menjalankan penelitian ini digunakan dua tahapan utama dalam kerangka penelitian global yang disesuaikan menurut penyusunan periodisasi penelitian selama dua tahun, yaitu tahap pertama yang telah dilakukan di tahun pertama yaitu pembangunan sistem pengukur cepat rambat gelombang laboratorium pada sampel tanah. Dalam tahap kedua di tahun ke-2 penelitian ini, telah dikembangkan peralatan instrumentasi pengukur lapangan yang selanjutnya disebut sebagai “In-Situ Portable Surface Waves Analyser (ISPSWA)”. Secara terperinci, uraian kedua tahapan utama penelitian dijelaskan berikut ini dan bagan alir kerangka (metode) penelitian secara global diberikan dalam Gambar 4.1.

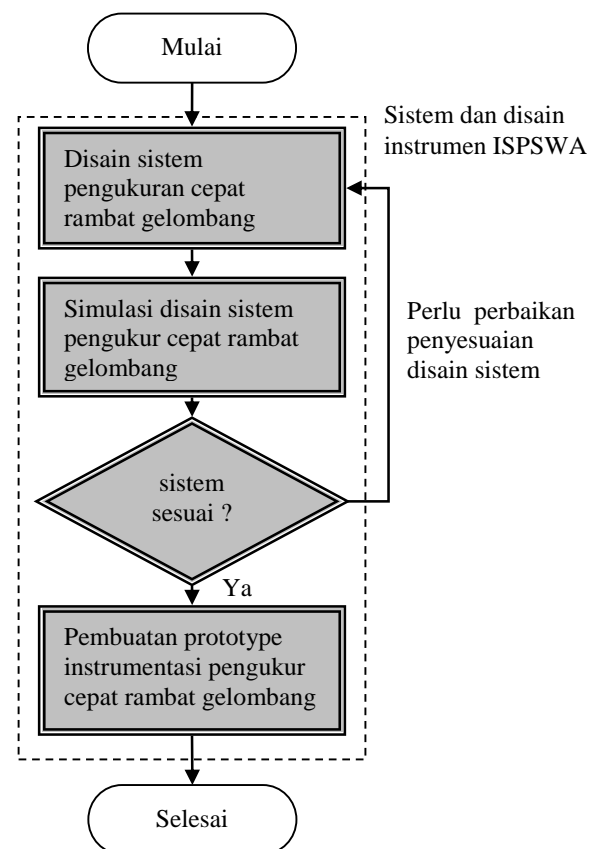


Gambar 4.1. Kerangka global penelitian

Dalam Gambar 3.1 dijelaskan secara umum kerangka penelitian multi-tahun yang diusulkan untuk tahun pertama dan kedua. Penelitian tahap pertama telah selesai dan tercapai sesuai dengan keluaran (*output*). Dalam penelitian tahun kedua ini diusulkan pembangunan alat “In-Situ Portable Surface Waves Analyser (ISPSWA)” dengan metodologi dan kegiatan penelitian dirincikan sebagai berikut.

4.1 Pembangunan Sistem dan Disain Prototipe ISPSWA

Dalam tahap ini, suatu sistem dan prototipe instrumentasi pengukur cepat rambat gelombang seismik di lapangan ISPSWA dibangun. Gambar 3.2 menunjukkan bagan alir tahap kegiatan penelitian pada tahap ini.



Gambar 4.2. Bagan alir tahap penelitian pembangunan sistem dan prototipe ISPSWA

Bagian pertama dari tahap penelitian tersebut adalah sistem ISPSWA yang meliputi sistem analisis, penyusunan algoritma dan pemrograman serta disain prototipe ISPSWA yang akan digunakan untuk instrumentasi pengukur cepat rambat gelombang tanah di lapangan.

4.1.1. Sistem Analisis

Sistem analisis yang akan dibangun meliputi:

- Data seismik dihasilkan dari sumber mekanik dengan frekuensi rendah yang akan dihasilkan dari rambatan energi mekanik benda jatuh bebas
- Data seismik dideteksi oleh seperangkat sensor yang disesuaikan dengan frekuensi dominan
- Data seismik ditransfer dalam bentuk digital dengan converter analog-digital data
- Data seismik berbasis waktu dianalisis dan ditransformasi dalam bentuk frekuensi menggunakan algoritma transformasi Fourier.
- Data frekuensi akan ditampilkan dalam beberapa spektrum diantaranya spektrum density, spektrum transfer function dan spektrum koheren.

4.1.2. Penyusunan Algoritma dan Pemrograman

Penyusunan algoritma dan pemrograman yang akan dilakukan meliputi:

- Analisis frekuensi dominan. Nilai rentang frekuensi gelombang seismik yang merambat perlu dikelompokkan dalam kecepatan fase prediksi dalam spektrum fungsi density untuk setiap karakteristik tanah. Nilai rentang frekuensi diperoleh menggunakan persamaan:

$$A_{12} = \frac{A_{puncak}}{\sqrt{2}} \begin{cases} f_1 = g(A_1) \\ f_2 = g(A_2) \end{cases} \quad (4.1)$$

dengan :

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

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

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

- Kecepatan fase gelombang. Kecepatan rambat akan dianalisis menggunakan metode beda fase dan beda waktu. Cepat rambat gelombang pada variasi tanah dengan kepadatan dan daya dukung berbeda dianalisis menggunakan konsep beda fase dan beda waktu. Waktu pergerakan gelombang (t) dapat dihitung

menggunakan nilai beda fase (ϕ) dari spektrum gelombang fungsi transfer (*transfer function*) melalui proses FFT data seismik gelombang dengan persamaan:

$$\phi = 2\pi f_0 t \quad (4.2)$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \quad (4.3)$$

$$V_{PH} = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (4.4)$$

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

Untuk analisis menggunakan metode beda waktu, persamaan yang digunakan adalah:

$$V_{PH} = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (4.5)$$

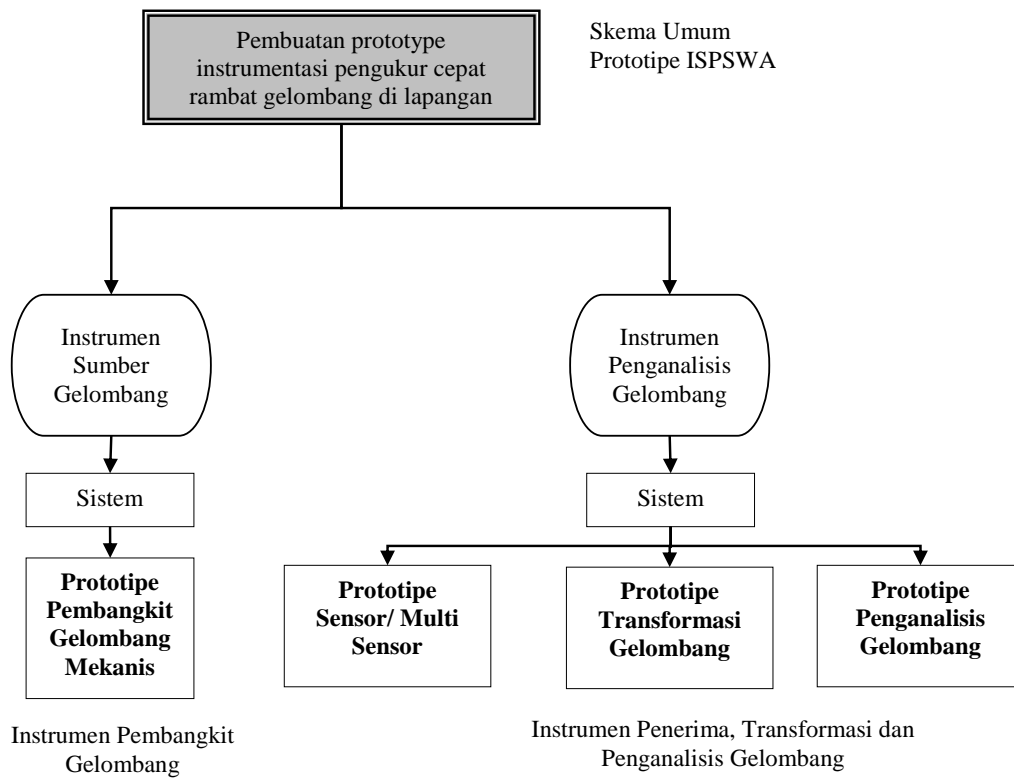
dengan : t_2 = waktu gelombang R yang diterima oleh sensor kedua, t_1 = waktu gelombang R yang diterima oleh sensor pertama

- Sistem akan disimulasikan dalam sebuah simulasi komputer bagi memastikan sistem instrumen dapat bekerja dengan baik dan menghasilkan hasil analisis data yang optimal.

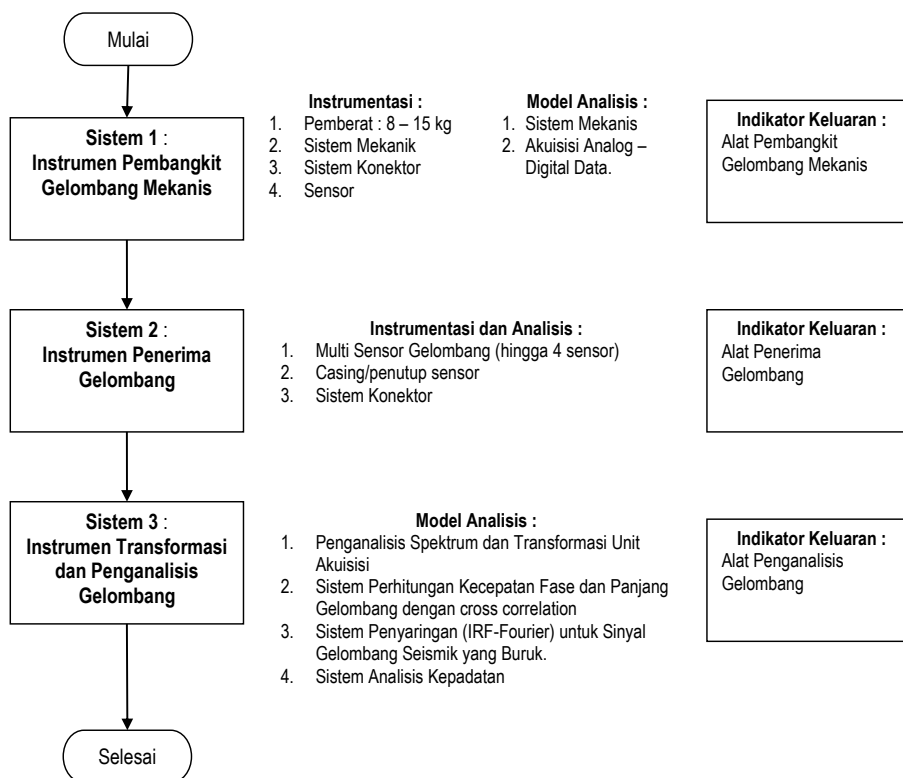
4.1.3. Pembangunan Prototipe ISPSWA

Pembangunan prototipe ISPSWA yang akan dilakukan adalah menyusun perangkat sistem dan instrumen yang sesuai untuk membangun alat ISPSWA. Prototipe dibangun dengan menggabungkan beberapa perangkat pengukur.

Dengan mengambil hasil simulasi sistem dari penelitian tahap pertama, keluaran dari tahap dua ini adalah disain alat, prototipe, dan prosedur uji ISPSWA. Gambaran umum skema penyusunan disain dan prototipe ISPSWA diberikan dalam Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Prototipe alat ini diharapkan dapat digunakan untuk mengembangkan instrumen alat ukur ISPSWA.



Gambar 4.3. Skema umum prototipe sistem instrumentasi ISPSWA



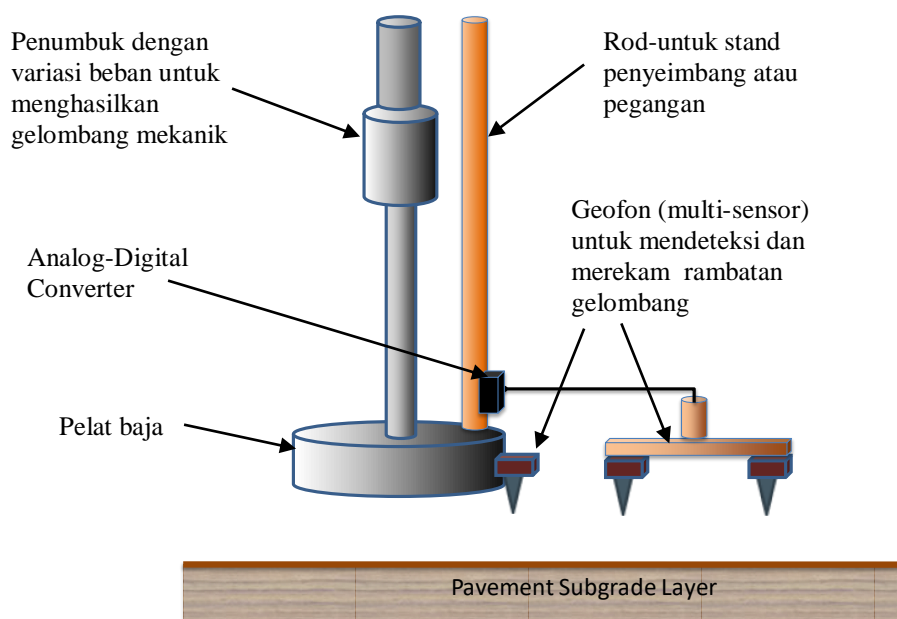
Gambar 4.4. Skema umum alur penyusunan prototipe sistem instrumentasi ISPSWA

4.2 Pembangunan Instrumentasi ISPSWA dan Kalibrasi Alat

Dalam tahap ini, alat ukur ISPSWA akan dibangun dan dikalibrasi dalam suatu pengujian laboratorium skala 1:1 untuk memastikan sistem dan peralatan bekerja baik dan akurat.

4.2.1. Pembangunan Instrumentasi

Instrumentasi ISPSWA terdiri dari komponen (Gambar 4.5): (1). pencatat rambat gelombang menggunakan sensor geofon, (2). sumber gelombang berfrekuensi sedang hingga tinggi yang dilengkapi dengan akselerometer, (3) unit akuisisi data dan penganalisis spektrum yang didalamnya akan dibangun sistem analisis data seismik.



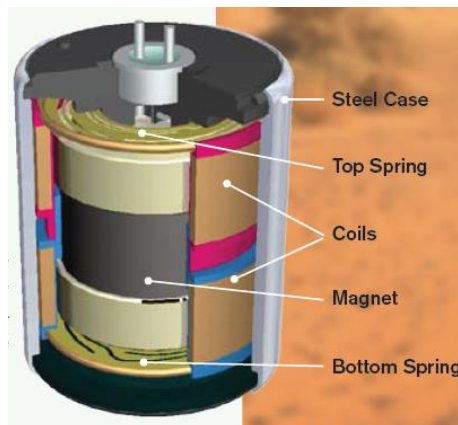
Gambar 4.5. Disain sistem instrumentasi multi-sensor ISPSWA lapangan

Dalam sistem ini, ISPSWA direncanakan menggunakan multi-sensor (geofon) untuk menerima dan merekam gelombang seismik yang dirambatkan dari sumber gelombang berupa impact dari berat jatuh yang diberikan oleh penumbuk pada pelat baja yang diletakkan di atas tanah. Gelombang mekanik (seismik) yang diterima oleh sensor geofon selanjutnya ditransfer dalam bentuk digital oleh konversi analog digital (ADC). Dari data digital akan direkam dan dimasukkan dalam instrumentasi berbasis mikro kontroler untuk menentukan cepat rambat gelombang seismik pada lapisan yang diukur.

a. *Sensor geofon*

Sensor adalah piranti yang menghasilkan isyarat listrik yang berkaitan dengan suatu besaran yang diukur. Dalam kehidupan manusia, sebagian getaran dan kejutan adalah dikehendaki sedangkan sebagian yang lain dapat mengganggu bahkan merusakkan. Oleh karena itu, getaran dan kejutan perlu diukur sehingga bias digunakan untuk melaksanakan pengendalian. Sensor yang digunakan untuk mengukur getaran dan kejutan adalah geofon.

Bagian utama geofone (Gambar 4.6) adalah kumparan bermagnet yang dihubungkan pada pegas. Apabila getaran mengenai permukaan geofon, getaran akan menggerakkan pegas dan kumparan sehingga dihasilkan tegangan listrik yang sebanding dengan kecepatan getaran.



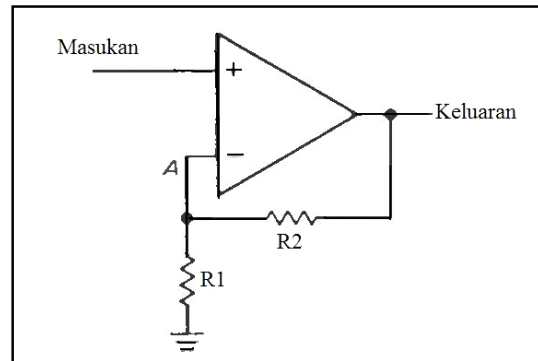
Gambar 4.6 Contoh bagian-bagian geofon (www.geophone.com)

Pada penelitian ini, sistem instrumentasi akan menggunakan geofon yang memiliki jangkauan frekuensi natural 4,5 Hz sampai 14 Hz sehingga sesuai untuk digunakan pada perkerasan tanah dengan sensitivitas 28 V/m/s dengan toleransi 5 %. Spesifikasi ini cukup bagus untuk kemudahan pengambilan data oleh sistem akuisisi data.

b. *Penguat instrumentasi*

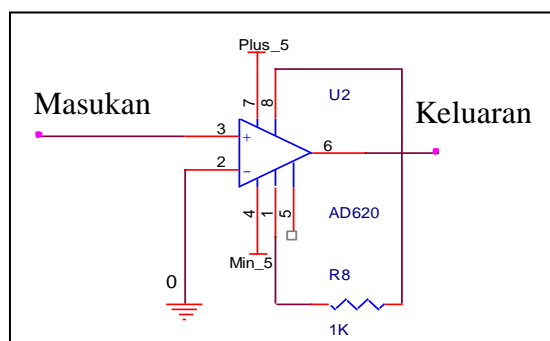
Pengujian geofon menunjukkan bahwa tegangan listrik yang dihasilkan oleh geofon akibat hentaman adalah kurang dari 0,5 volt. Tegangan ini sangat kecil dan harus dikuatkan terlebih dahulu sebelum dikirim kepada piranti lain. Oleh karena itu, rangkaian penguat instrumentasi perlu dirancang dan dibuat sebelum isyarat tegangan dibaca oleh sistem akuisisi data. Rangkaian penguatan dapat dibuat

menggunakan operational-amplifier (op-amp) dan resistor sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.7. Penguatan yang dihasilkan dapat diperoleh menggunakan hubungan $G = 1 + \frac{R2}{R1}$.



Gambar 4.7 Penguat non-inverting

Disain ini menggunakan komponen penguat instrumentasi yang telah ada di pasaran yaitu AD620 produksi Analog Devices (Gambar 4.8). Komponen ini dipilih karena memiliki spesifikasi tinggi, diantaranya berkecepatan tinggi (masa tunak $15 \mu s$ kepada 0.01%), derau kecil ($0.28 \mu V_{p-p}$) dan tenaga kecil (arus terbesar $1.3 mA$). Penguatan maksimum yang dapat diperoleh adalah 10.000.



Gambar 4.8 Rangkaian penguat instrumentasi menggunakan AD620

c. *Pengatur sensitivitas*

Pengatur sensitivitas digunakan untuk mengatur besar kecilnya penguatan rangkaian penguat instrumentasi. Bagian ini bekerja menggunakan *variable resistor* atau potensiometer untuk mengatur besar kecilnya penguatan. Bila

gelombang hasil hentaman terlalu kecil, penguatan ditinggikan sehingga diperoleh nilai tegangan yang cukup untuk dibaca oleh sistem akuisisi data. Akan tetapi, penguatan juga tidak boleh terlalu tinggi karena akan menyebabkan ikut menguatnya derau yang akan mengganggu pembacaan hasil gelombang permukaan.

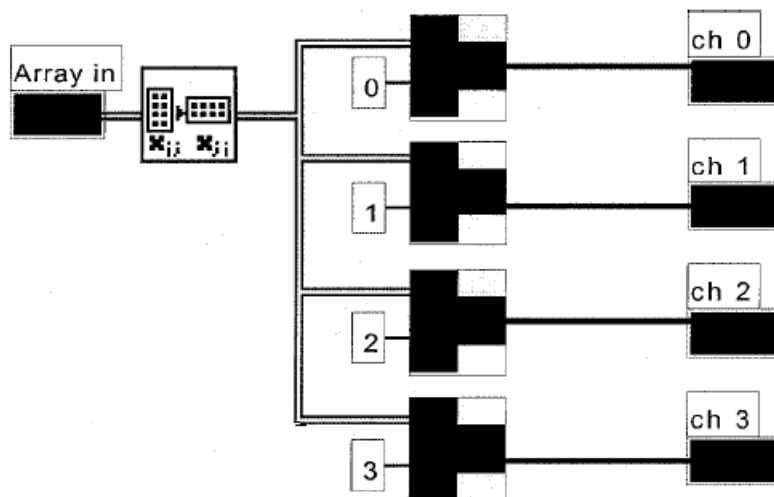
d. *Komputer notebook*

Komputer notebook dipilih agar peralatan yang akan dibuat lebih *portable*, ringan dan mudah dibawa ke lokasi pengukuran. Spesifikasi yang disarankan adalah notebook dengan processor Core 2 Duo, 2 GHz, RAM 1 GB. Spesifikasi ini sesuai untuk melakukan akuisi data dan komputasi menggunakan MATLAB. Komputer harus mempunyai koneksi USB 2.0 untuk menghubungkan kartu data akuisisi.

e. *Sistem akuisisi data*

Sistem akuisisi data adalah bagian terpenting dari instrumen yang terdiri dari kartu dan toolbox akuisisi data. Kartu akuisisi data yang dipilih adalah multi fungsi Labjak.

Kartu ini memiliki 4 masukan analog 14-bit dengan kecepatan mengambil sampel 48.000 sampel/detik, dua keluaran analog (12 bit, 150 sampel/detik) dan 12 digital I/O dengan 32 bit counter. Kartu ini dihubungkan ke komputer melalui USB sehingga sangat sesuai dan mudah dengan perkembangan komputer sekarang ini. Hasil atau output sistem ini adalah data spektrum yang selanjutnya akan dianalisis dalam sistem MTSW. Dalam instrumen ini juga, data akuisisi akan memiliki konektor 4 sensor sebagaimana diberikan dalam Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Program data akuisisi terhadap 4 sensor

4.1.2 Kalibrasi Alat

a. Kalibrator

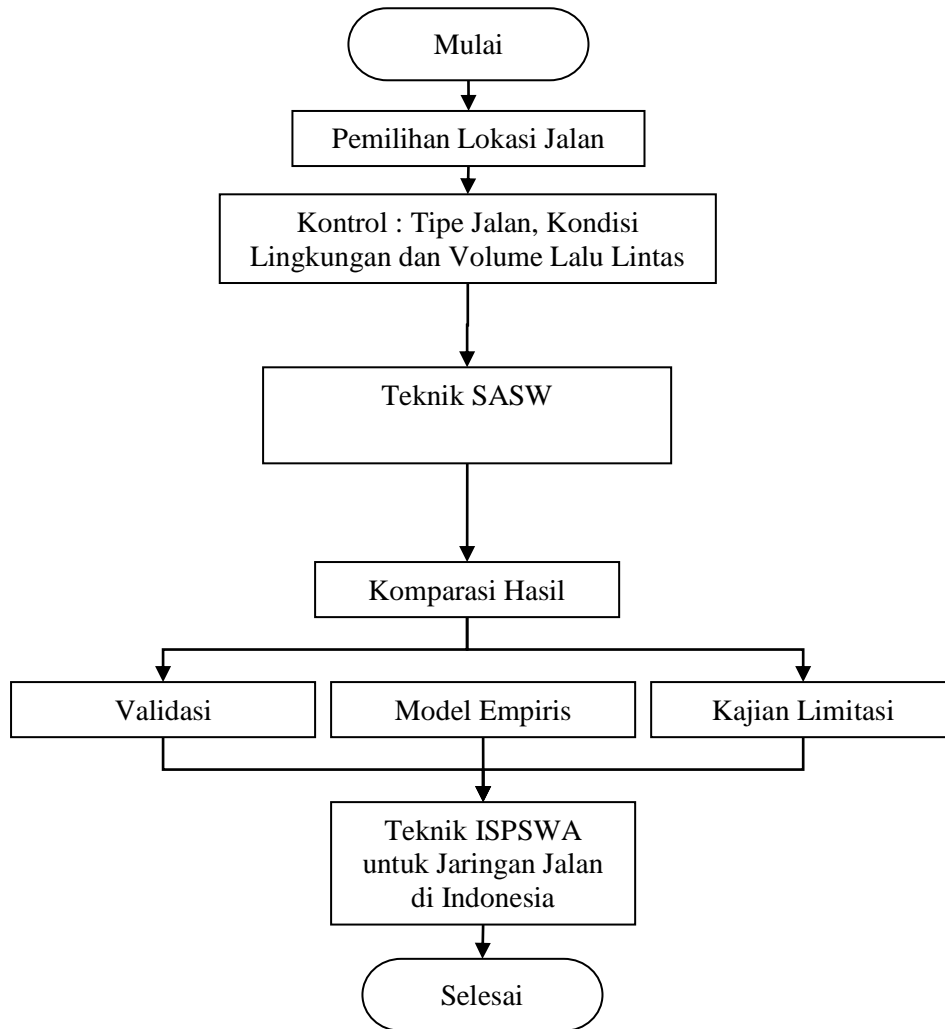
Kalibrasi alat akan dilakukan dengan menguji instrumen ISPSWA dalam suatu soil box (SB) dengan skala pengujian laboratorium 1 : 1. SB pada sampel yang dikondisikan seperti kondisi lapangan.

b. Sampel Tanah

Penelitian ini direncanakan akan fokus pada sampel dua jenis tanah yang berbeda yaitu tanah berpasir dan pasir. Sebelumnya, pengujian dasar tanah (sifat fisik, indeks plastisitas) dan pengujian mekanis (pemadatan, kuat tekan bebas, CBR) akan dijalankan pada kedua jenis tanah tersebut. Selanjutnya, sampel tanah dari kedua jenis tanah dengan berbagai variasi kepadatan dan daya dukung tanah (CBR dan nilai tekan bebas, parameter c dan ϕ) akan disiapkan untuk digunakan sebagai media kalibrator pengujian cepat rambat gelombang. Prosedur pengujian tanah dalam penelitian ini merujuk kepada SNI dan ASTM.

4.3 Pengukuran Lapangan Pembanding dan Pembangunan Model Empirik

Hasil pengukuran ISPSWA dari penelitian tahap kedua akan diverifikasi dan divalidasi dengan pengujian pendamping Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW). Skematik kerja tahapan ini diberikan dalam Gambar 4.10. Hasil pengujian pembanding akan ditampilkan dalam parameter kekakuan dan kepadatan bahan. Standar pengujian SASW mengikuti standar yang berlaku.



Gambar 4.10 Alur eskperimen dalam tahapan pengujian pembandingan dan pembangunan model empirik

Beberapa model analitik-empirik kecepatan gelombang seismik terhadap kepadatan-daya dukung tanah diturunkan berdasarkan persamaan dasar cepat rambat gelombang yang dimodifikasi dengan mempertimbangkan berbagai parameter tanah dan hasil pengukuran pembandingan yang dilakukan di laboratorium dan lapangan.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Pembangunan Sistem Pengukur Cepat Rambat Gelombang Lapangan

Pembangunan suatu sistem dan instrumentasi pengukur cepat rambat gelombang seismik di lapangan telah selesai dibangun dari penelitian ini. Bagian terpenting dari tahap pembangunan instrument ini adalah menyusun algoritma, pemrograman dan sistem instrumen yang akan digunakan untuk membangun sistem dan instrumentasi pengukur cepat rambat gelombang tanah di laboratorium. Sistem yang dibangun menggunakan konsep “analisis analog-digital data” gelombang seismik berbasis algoritma transformasi Fourier dan Wavelet. Basis algoritma Fourier dan Wavelet yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan hasil rekomendasi penelitian Rosyidi dkk. (2009). Sistem akan disimulasikan dalam sebuah simulasi komputer bagi memastikan sistem instrumen dapat bekerja dengan baik dan menghasilkan hasil analisis data yang optimal. Keluaran dari bagain pertama ini adalah suatu sistem, prosedur dan alat uji pengukur cepat rambat gelombang di laboratorium untuk sampel tanah. Saat ini, alat uji pengukur cepat rambat gelombang pada sampel tanah di lapangan belum ada yang bersifat *direct measurement* (pengukuran langsung). Dalam penelitian ini, dibangun suatu sistem dan instrumen pengukur cepat rambat gelombang seismik pada tanah secara langsung.

Sistem instrumentasi terdiri dari komponen (Gambar 5.1): (1). pencatat rambat gelombang menggunakan geofon, (2). sumber gelombang berfrekuensi sedang hingga tinggi yang dilengkapi dengan akselerometer, (3) unit akuisisi data dan (4). penganalisis spektrum yang didalamnya akan dibangun sistem analisis data seismik.

Dalam kegiatan penelitian ini difokuskan pada pemilihan instrumen yang digunakan dalam pengukuran cepat rambat gelombang. Kegiatan penelitian dimulai dengan mengukur sifat dan karakteristik perambatan gelombang R dalam simulasi komputasi. Parameter yang ditinjau adalah nilai frekuensi dan mode gelombang R. Parameter tersebut adalah efektif untuk digunakan sebagai indikator pemilihan dan pengukur instrumen diantaranya sensor gelombang (*transducer*), penganalisis spektrum dan sumber gelombang yang digunakan. Selanjutnya dilakukan proses pemilihan variabel kalibrasi pada masing-masing instrumen melalui proses simulasi

parameter frekuensi dan mode gelombang terhadap output data yang dikeluarkan oleh instrument. Proses ini diakhiri dengan penyusunan sistem SASW yang digunakan untuk penilaian nilai dinamik perkerasan jalan.

○ **Sensor**

Dalam penelitian ini digunakan (dipilih) sensor jenis *geophone* dengan respon frekuensi rendah. Pemilihan sensor ini didasarkan kemampuan untuk mendeteksi dan merekam getaran dari rentang frekuensi rendah (untuk lapisan tanah dasar). Wilayah frekuensi didapatkan dari simulasi respon frekuensi yang diperlukan dan uji kalibrasi lapangan. Akselerometer yang dipilih bagi penelitian ini adalah piezoelektrik dengan 3 sumbu dengan rentang reaksi frekuensi $\pm 5\%$ pada 50 hingga 200 Hz atau geophone pada rentang respon frekuensi dasar untuk 4 – 100 Hz.

○ **Analog Digital Converter (ADC) dan Penganalisis Spektrum**

Penganalisis spektrum merupakan peralatan osiloskop (ADC) dan perekam data sinyal analog ke digital melalui metode FFT. Peralatan penganalisis spektrum terdiri dari satu unit akuisisi (*acquisition unit*) ADC yang dihubungkan kepada komputer “notebook” melalui kartu PC. Partikel gelombang R yang diterima sensor adalah data analog akselerasi yang diubah ke dalam bentuk digital melalui unit akuisisi dan seterusnya dijalankan operasi spektrum oleh komputer. Dalam penelitian ini dipilih unit akuisisi ADC yang dapat 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.

Gambar 5.1 menunjukkan susunan peralatan dan instrumentasi dari ADC dan susunan sensor untuk 2 penerima gelombang. ADC nantinya akan dirangkai dalam satu kotak (box) alat seperti diperlihatkan dalam Gambar 5.1 yang akan dilengkapi sambungan kontak ke sensor dan komputer sebagai basis operasinya.

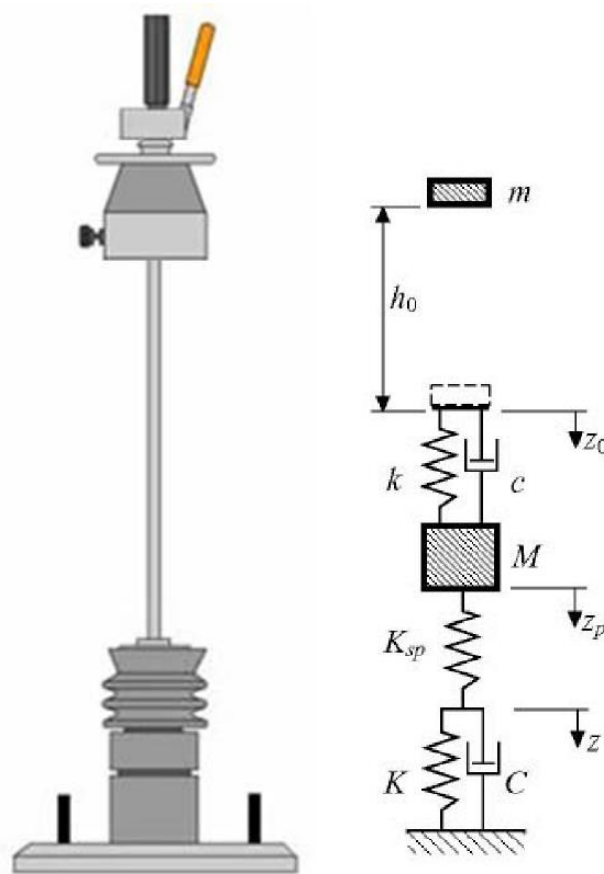


Gambar 5.1 Rangkaian instrumen ADC, sensor penerima gelombang dan penganalisis data yang digunakan dalam penelitian ini.

○ Sumber Mekanik Gelombang

Sumber mekanik gelombang yang digunakan untuk pengujian digunakan yang mampu menghasilkan tenaga gelombang permukaan Rayleigh pada rentang frekuensi yang diperlukan dalam pengukuran. Dalam penelitian ini akan digunakan jenis sumber sementara (*transient source*), berupa *dropped weight* yang dijatuhkan secara mekanis di atas permukaan tanah. Keباikan penggunaan berbagai jenis sumber gelombang ini adalah kemudahan dalam mobilitas dan pengukuran di lapangan. Tambahan lagi, sumber ini dapat untuk menghasilkan pengukuran domain waktu bagi peningkatan kualitas sinyal terhadap gangguan (*signal to noise ratio*). Gambar 5.2

menunjukkan gambar disain peralatan *dropped weight* yang sedang diselesaikan pembuatannya.

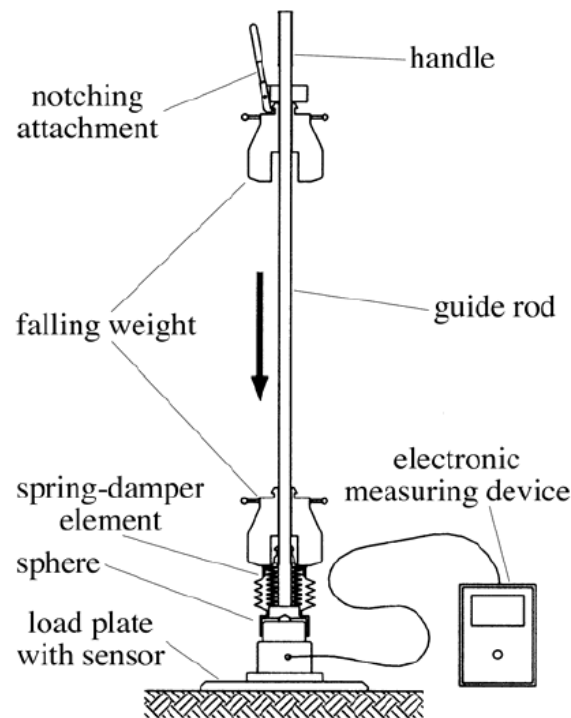


Gambar 5.2 Disain alat *dropped weight* sebagai sumber gelombang pada instrumen ISPSWA

Gambar 5.2 menunjukkan disain *dropped weight* (DW), yang dirangkai dari batang (*probe*) baja sebagai tiang utama, yang dikoneksikan dengan pelat dasar baja (tebal). DW juga dilengkapi (didisain) dengan sistem mekanis spring-dashpot untuk memastikan tinggi jatuh, energi, tegangan dan mekanisme perpindahan energi mekanis menjadi gelombang terukur dengan baik. Dalam pelat dasar, akan dilengkapi juga satu geophone untuk mendeteksi waktu permulaan pukulan bagi mengenali awal waktu rambatan gelombang mekanis yang dihasilkan. Gambar 5.3 lebih jelasnya lagi menunjukkan disain DW yang diselesaikan dalam tahap ini.

Meskipun sistem instrumen sudah selesai namun saat ini komponen peralatan sedang diselesaikan khususnya untuk sumber gelombang *dropped weight* dan mekanisme susunan ADT analog digital converter dan sensor yang disusun dalam

satu sistem terintegrasi. Tahapan selanjutnya adalah pembuatan alat ISPSWA yang telah dihasilkan dari penelitian ini.



Gambar 5.3. Disain lengkap DW pada alat ISPSWA

5.2 Disain Sistem Pengukur Cepat Rambat Gelombang Lapangan

Dalam tahapan ini dibagi dalam dua bagian analisis yaitu analisis sinyal dengan metode FFT dan wavelet dan kedua adalah analisis cepat rambat gelombang fase (hubungan di antara V_{PH} dan frekuensi).

- Analisis FFT untuk Sinyal

Teori Dasar: Aplikasi Cooley-Tukey untuk Analisis Spektrum Gelombang R

Tahapan terpenting dalam metode SASW adalah analisis dan interpretasi data gelombang permukaan dari hasil perekaman di lapangan. Data gelombang permukaan berdomain waktu diterima dalam bentuk digital melalui suatu unit akuisisi, seterusnya melalui proses *fast Fourier transform* (FFT) atau transformasi Fourier cepat menggunakan algoritma Cooley-Tukey (Cooley & Tukey 1965; Brillinger 2002) ditampilkan dalam beberapa bentuk spektrum berdomain 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).

Algoritma Cooley-Tukey menyatakan ulang fungsi *discrete Fourier transform* (DFT) pada ukuran komposit random $N = N_1 N_2$ untuk tinjauan DFTs yang lebih kecil untuk ukuran N_1 dan N_2 secara berulang, yang digunakan untuk mengurangi waktu komputasi komposit N yang tinggi (lebih angka terperinci). Terdapat beberapa keuntungan dalam penggunaan DFT untuk pemrosesan sinyal gelombang seismik, yaitu proses analisis yang lebih strategis, memiliki fasilitas spektrum dalam melakukan interpretasi, lebih unggul dalam karakteristik sistem sinyal dan memiliki algoritma yang efisien (Santamarina & Fratta 1998).

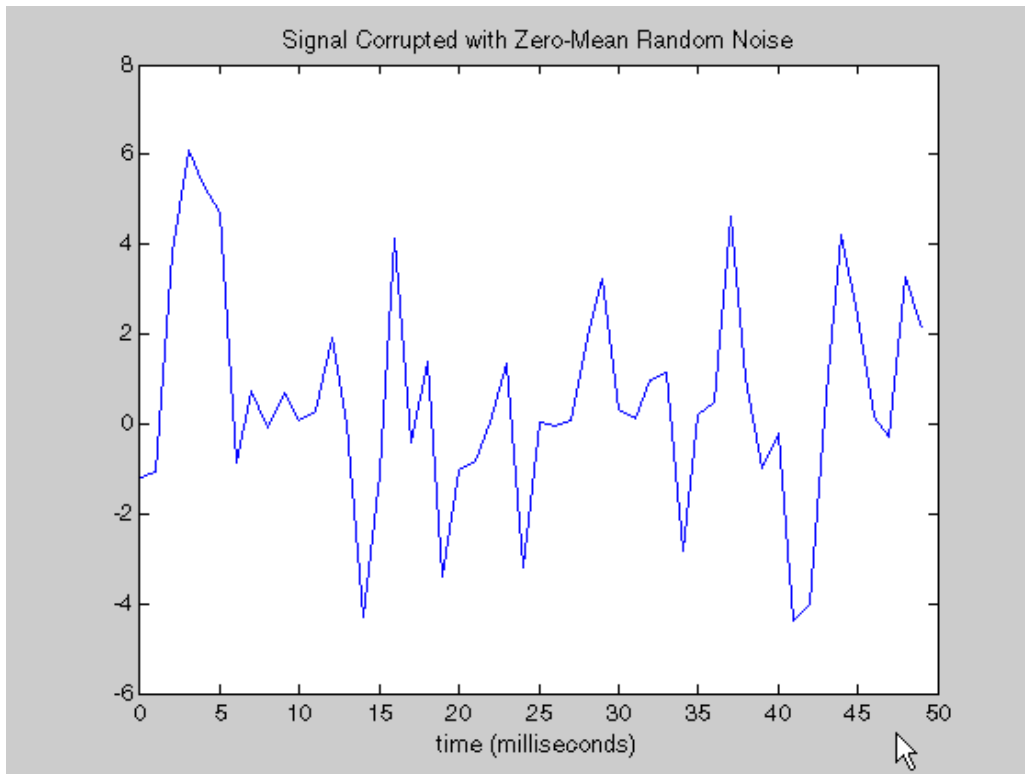
Contoh analisis FFT:

A common use of Fourier transforms is to find the frequency components of a signal buried in a noisy time domain signal. Consider data sampled at 1000 Hz. Form a signal containing a 50 Hz sinusoid of amplitude 0.7 and 120 Hz sinusoid of amplitude 1 and corrupt it with some zero-mean random noise:

```

Fs = 1000;           % Sampling frequency
T = 1/Fs;           % Sample time
L = 1000;           % Length of signal
t = (0:L-1)*T;      % Time vector
% Sum of a 50 Hz sinusoid and a 120 Hz sinusoid
x = 0.7*sin(2*pi*50*t) + sin(2*pi*120*t);
y = x + 2*randn(size(t)); % Sinusoids plus noise
plot(Fs*t(1:50),y(1:50))
title('Signal Corrupted with Zero-Mean Random Noise')
xlabel('time (milliseconds)')

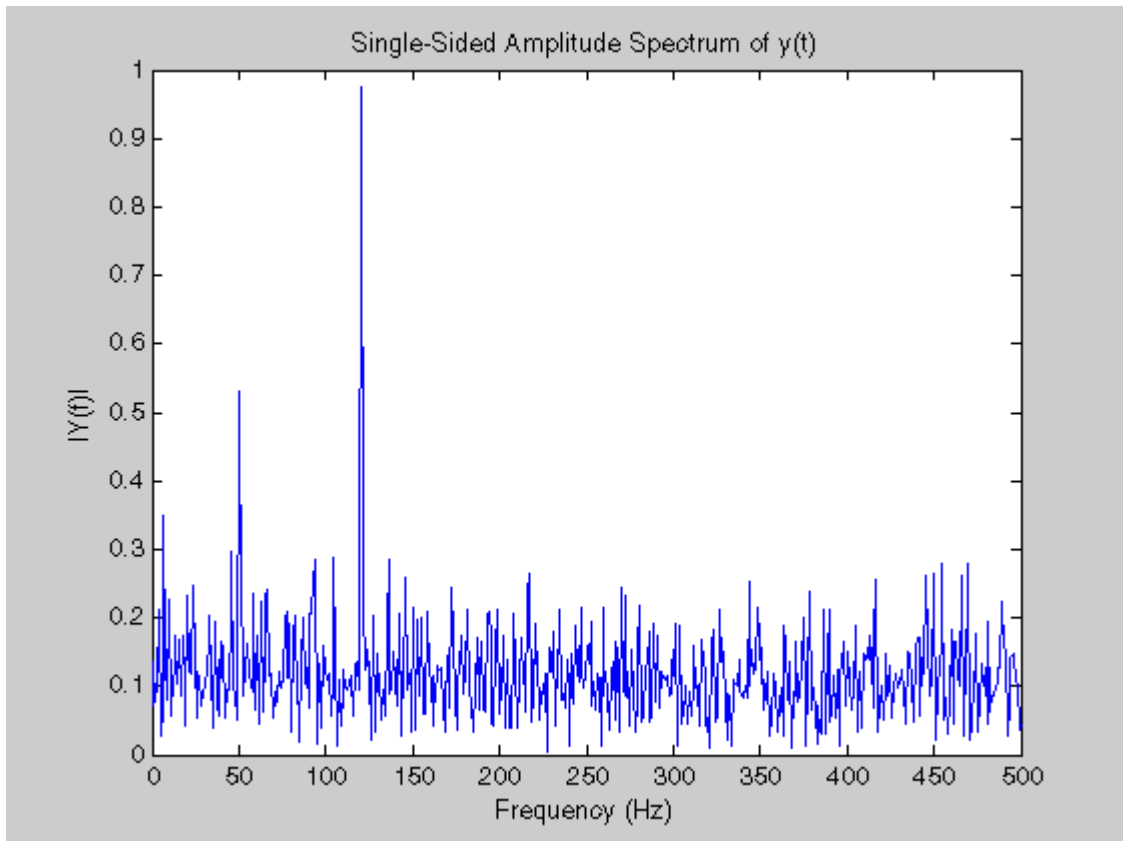
```



It is difficult to identify the frequency components by looking at the original signal. Converting to the frequency domain, the discrete Fourier transform of the noisy signal y is found by taking the fast Fourier transform (FFT):

```
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum.
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
```

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

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

$$G_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad (5.1)$$

disini $S_x(f)$ adalah spektrum linear yang merupakan bentuk sederhana dari transformasi Fourier dari sinyal $x(t)$ dalam domain waktu. Spektrum ini merupakan fungsi kompleks yang dapat diwakili oleh bagian nyata dan imajiner atau dengan nilai magnitude dan fase. Secara matematik, persamaan spektrum linier dapat dituliskan dalam bentuk:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (5.2)$$

Spektrum tenaga auto merupakan bentuk nyata dan fungsi positif yang dapat dinyatakan sebagai kuasa getaran dalam fungsi frekuensi gelombang yang dihasilkan.

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

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (5.3)$$

Fungsi perpindahan juga dikenali sebagai fungsi reaksi frekuensi. Jika kedua-dua 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 :

$$H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} = \frac{A_2}{A_1} \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + i \sin(\phi_2 - \phi_1) \} \quad (5.4)$$

disini $(\phi_2 - \phi_1)$ adalah perbezaan 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 linier (Gucunski 1991).

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

$$\gamma^2(f) = \frac{[G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)]}{[G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)]} \quad (5.5)$$

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 et al. (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 di antara 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.

▪ Analisis Sinyal dengan Wavelet

- Continuous 1-D wavelet transform

Syntax

-
- `coefs = cwt(x,scales,'wname')`
`coefs = cwt(x,scales,'wname','plot')`
`coefs = cwt(x,scales,'wname','coloration')`
`coefs = cwt(x,scales,'wname','coloration',xlim)`
`[coefs,sgram] = cwt(x,scales,'wname','scal')`
`[coefs,sgram] = cwt(x,scales,'wname','scalCNT')`
`[coefs,frequencies] = cwt(x,scales,wname, samplingperiod)`
`[coefs,sgram,frequencies] = cwt(x,scales,wname, samplingperiod,'scal')`
 - `coefs = cwt(x,scales,'wname')` returns the continuous wavelet transform (CWT) of the real-valued signal *S*. The wavelet transform is computed for the specified scales using the analyzing wavelet *wname*. *scales* is a 1-D vector with positive elements. The string *wname* denotes a wavelet recognized by `wavemngr`. *coefs* is a matrix with the number of rows equal to the length of *scales* and number of columns equal to the length of the input signal. The *k*-th row of *coefs* corresponds to the CWT coefficients for the *k*-th elements in the *scales* vector.
 - `coefs = cwt(x,scales,'wname','plot')` plots the continuous wavelet transform coefficients, using default coloration 'absglb'.
 - `coefs = cwt(x,scales,'wname','coloration')` uses the specified coloration. See [Definitions](#) for coloration options.
 - `coefs = cwt(x,scales,'wname','coloration',xlim)` colors the coefficients using coloration and *xlim*, where *xlim* is a vector, [*x1 x2*], with $1 \leq x1 < x2 \leq \text{length}(x)$.
 - `[coefs,sgram] = cwt(x,scales,'wname','scal')` returns and plots the scalogram. 'scal' produces an image plot of the scalogram.
 - `[coefs,sgram] = cwt(x,scales,'wname','scalCNT')` displays a contour representation of the scalogram.
 - `[coefs,frequencies] = cwt(x,scales,wname, samplingperiod)` returns the frequencies in cycles per unit time corresponding to the scales and the analyzing wavelet *wname*. *samplingperiod* is a positive real-valued scalar. If the units of *samplingperiod* are seconds, the frequencies are in hertz.

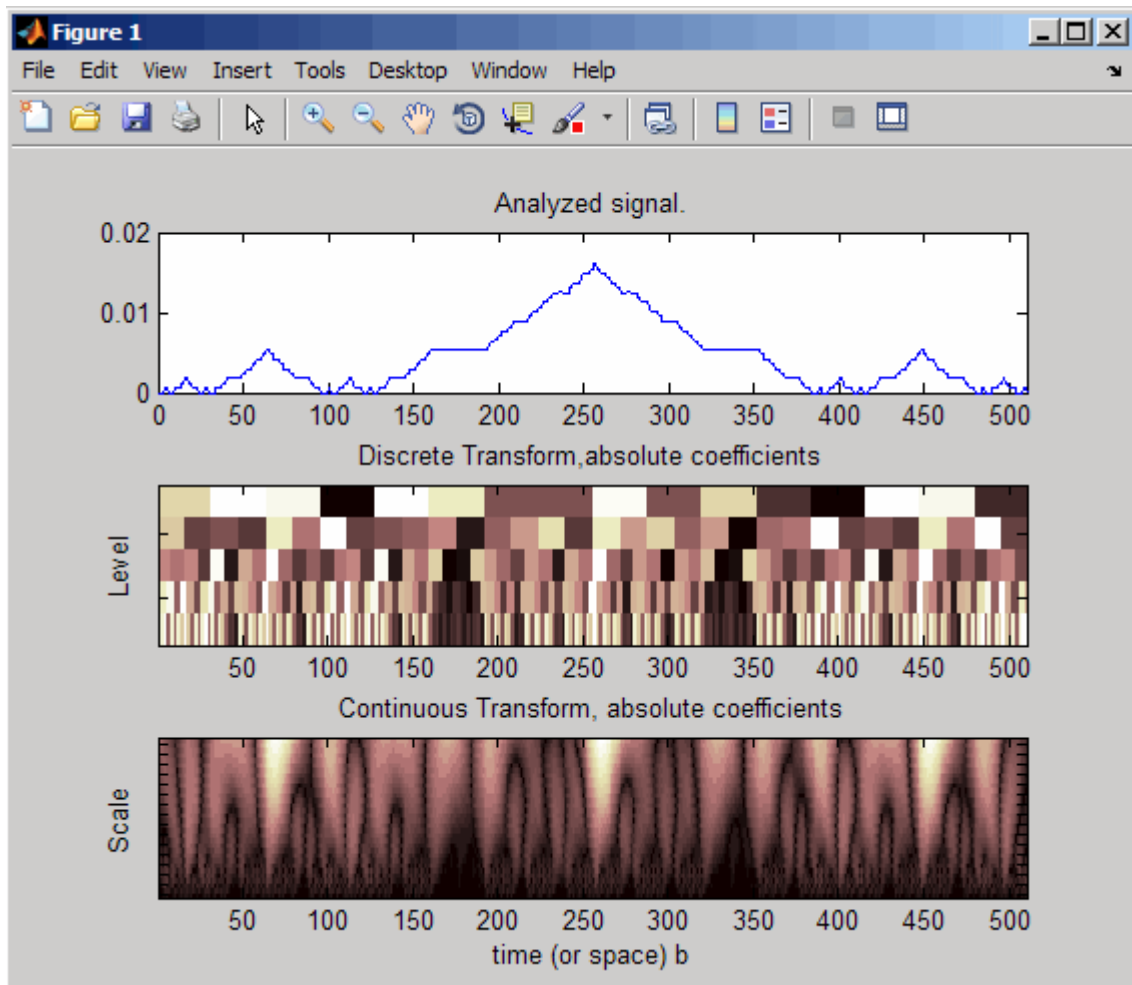
- `[coefs,sgram,frequencies] = cwt(x,scales,wname,samplingperiod,'scal')` returns the scalogram and the frequencies corresponding to the scales and the analyzing wavelet. You can also use the flag `'scalCNT'` to output the scalogram if you have at least two elements in `scales`.
The `samplingperiod` is only used in the conversion of scales to frequencies. Specifying `samplingperiod` does not affect the appearance of plots generated by `cwt`.

-

Contoh

- Plot the continuous wavelet transform and scalogram using `sym2` wavelet at all integer scales from 1 to 32, using a fractal signal as input:
 - `load vonkoch`
 - `vonkoch=vonkoch(1:510);`
 - `len = length(vonkoch);`
 - `cw1 = cwt(vonkoch,1:32,'sym2','plot');`
 - `title('Continuous Transform, absolute coefficients.')`
 - `ylabel('Scale')`
 - `[cw1,sc] = cwt(vonkoch,1:32,'sym2','scal');`
 - `title('Scalogram')`
 - `ylabel('Scale')`
- Compare discrete and continuous wavelet transforms, using a fractal signal as input:
 - `load vonkoch`
 - `vonkoch=vonkoch(1:510);`
 - `len=length(vonkoch);`
 - `[c,l]=wavedec(vonkoch,5,'sym2');`
 - `% Compute and reshape DWT to compare with CWT.`
 - `cfD=zeros(5,len);`
 - `for k=1:5`
 - `d=detcoef(c,l,k);`
 - `d=d(ones(1,2^k),:);`
 - `cfD(k,:)=wkeep(d(:)',len);`
 - `end`
 - `cfD=cfD(:);`
 - `I=find(abs(cfD) < sqrt(eps));`
 - `cfD(I)=zeros(size(I));`
 - `cfD=reshape(cfD,5,len);`
 - `% Plot DWT.`

- subplot(311); plot(vonkoch); title('Analyzed signal.');
- set(gca,'xlim',[0 510]);
- subplot(312);
- image(flipud(wcodemat(cfd,255,'row')));
- colormap(pink(255));
- set(gca,'yticklabel',[]);
- title('Discrete Transform,absolute coefficients');
- ylabel('Level');
- % Compute CWT and compare with DWT
- subplot(313);
- ccfs=cwt(vonkoch,1:32,'sym2','plot');
- title('Continuous Transform, absolute coefficients');
- set(gca,'yticklabel',[]);
- ylabel('Scale');



▪ **Model Perhitungan Beda Fase (Phase Different Method)**

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

Persamaan dasar metode ini dijelaskan sebagai berikut:

$$\phi = 2\pi f_0 t \quad (5.6)$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \quad (5.7)$$

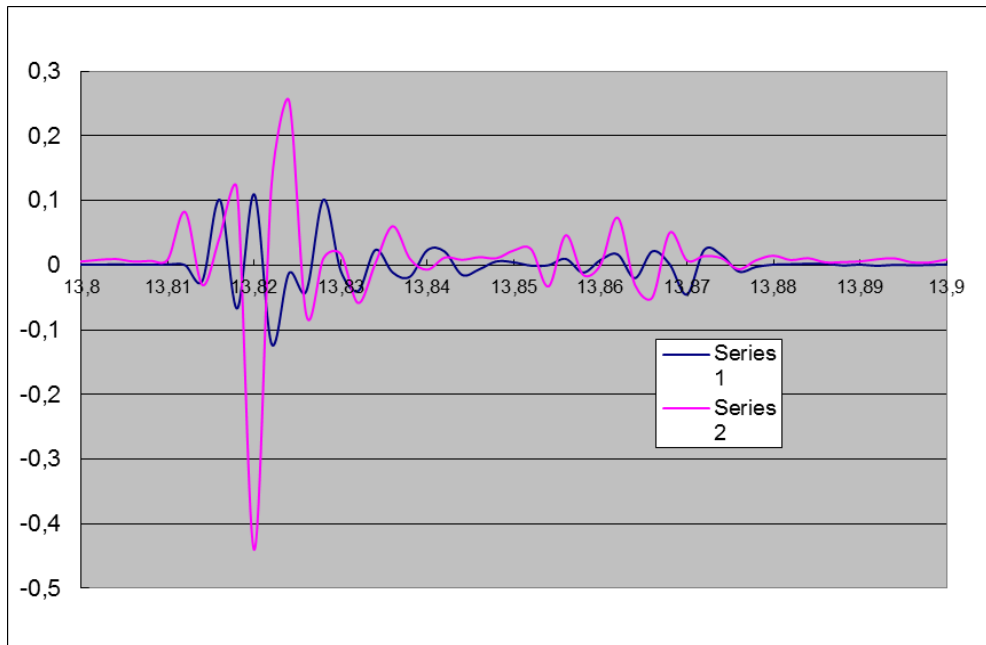
$$V_{PH} = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (5.8)$$

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

5.3. Respon Seismik Hasil Pengukuran Pada Tanah Uji

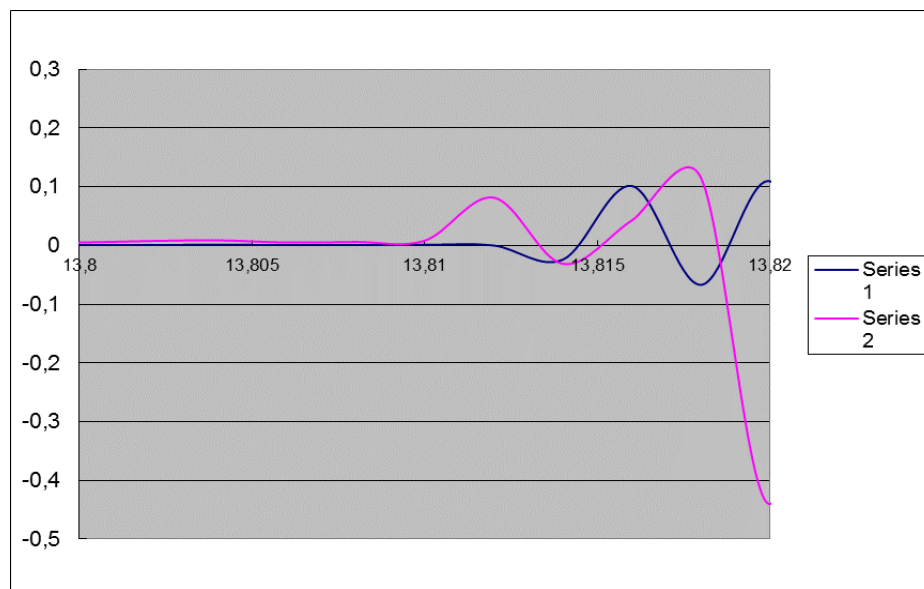
5.3.1 Analisis Waktu dan Frekuensi Gelombang Permukaan

Data seismik dihasilkan dari pengukuran gelombang seismik pada sampel tanah sesuai dengan konfigurasi pengukuran sensor sejajar (KSS) dengan jarak antar sensor dan jarak sensor kepada sumber mekanik adalah sama. Pengukuran dilakukan dari beberapa kali perekaman perambatan gelombang yang dihasilkan oleh sumber gelombang mekanik di atas lapisan sampel dengan menggunakan pemukul mekanik. Gambar 5.4 menunjukkan corak data seismik yang direkam di lapangan.



Gambar 5.4 Pola rekaman data seismik pada sampel tanah

Dari Gambar 5.4 di atas, dapat dilihat bahwa gelombang permukaan Rayleigh berkontribusi energi terbesar. Hal ini bisa dideteksi dari amplitudo terbesar yang diterima oleh sensor dari sinyal gelombang. Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5.5 berikut ini, yang merupakan hasil pembesaran rekaman gelombang dari Gambar 5.4.

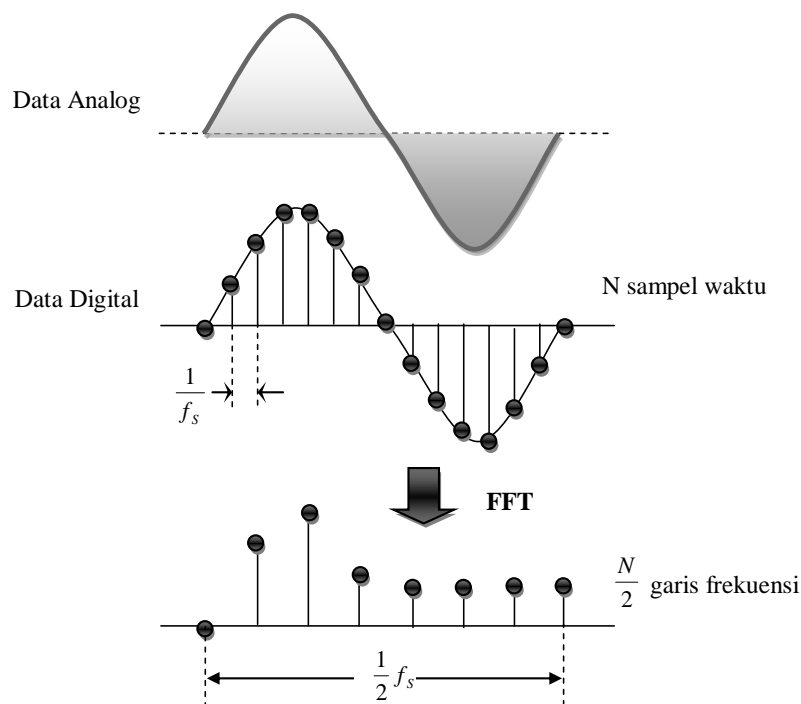


Gambar 5.5. Detil pola rekaman data seismik pada sampel yang menunjukkan amplitudo gelombang Rayleigh

Analisis selanjutnya yang perlu dilakukan untuk menghasilkan parameter ukur seismik dan parameter dalam domain frekuensi menggunakan analisis Cooley-Tukey

atau analisis FFT (*fast Fourier transform*). Dalam analisis ini, data gelombang seismik berdomain waktu dialihkan/ditransformasikan ke dalam domain frekuensi. Tujuan utama analisis ini adalah mendapatkan parameter seismik yang lebih jelas berdomain frekuensi untuk dianalisis guna mendapatkan sifat bahan jalan. Penggunaan analisis frekuensi ini akan meminimalisasi penggunaan algoritma yang kompleks dalam analisis data seismik berdomain waktu.

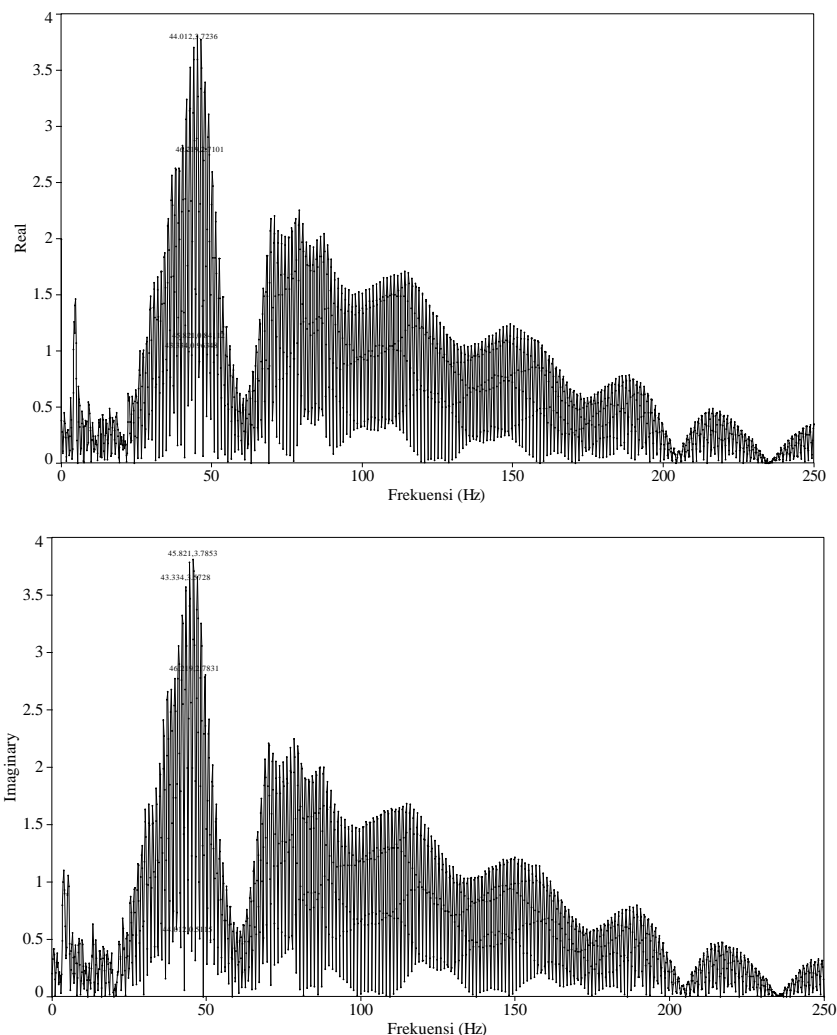
Gambar 5.6 menunjukkan diagram proses sederhana tentang analisis domain waktu ke domain frekuensi menggunakan algoritma Cooley-Tukey atau FFT. Dasar algoritma yang digunakan adalah integral Fourier yang mendiskritkan suatu persamaan menggunakan fungsi dasar sinus dan kosinus. Data analog gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik dikonversikan ke dalam data digital menggunakan ADC atau unit akuisisi. Data blok digital diperlukan oleh algoritma dalam proses FFT untuk merubah domain waktu ke domain frekuensi. Selanjutnya beberapa tampilan spektrum bisa dihasilkan dari spektrum sinyal digital. Proses ini berjalan dalam fungsi linier sehingga aplikasi algoritma tidak kompleks.



Gambar 5.6 Diagram alir proses FFT untuk tampilan spektrum

Analisis data seismik yang pertama dilakukan untuk mendapatkan respon energi dalam domain frekuensi melalui plot spektrum auto-density. Gambar 5.7

menunjukkan hasil analisis FFT dalam bentuk spektrum real-imaginary dari sinyal Gambar 5.4. Amplitudo gelombang seismik berdomain waktu yang direkam telah ditransformasikan ke bentuk frekuensi. Gambar 5.7 menunjukkan tampilan spektrum magnitudo yang menunjukkan besaran energi gelombang seismik terhadap frekuensinya. Dari spektrum magnitudo dapat diperoleh bahwa wilayah frekuensi respon berada pada wilayah 30 hingga 50 Hz dengan puncak amplitudo pada frekuensi 45,84 Hz. Wilayah frekuensi ini sesuai dengan respon frekuensi untuk tanah.



Gambar 5.7 Tampilan spektrum real-imaginary hasil analisis FFT untuk pengukuran sampel tanah

5.3.2 Analisis Kecepatan Rambat Gelombang Permukaan

Kecepatan rambat gelombang permukaan (V_R) dalam penelitian ini dapat ditentukan menggunakan dua metode, yaitu (1). Beda waktu rambat (*time different method*), dan (2). Beda fase (*phase different method*).

1). Beda waktu rambat (*time different method*)

Cepat rambat gelombang R dapat ditentukan dengan mengukur waktu rambatan atau perjalanan gelombang antara dua sensor pada sampel uji. Gambar 5.8 menjelaskan bagaimana metode ini digunakan dan persamaan kecepatan rambatnya dapat dijelaskan berikut ini:

$$V_R = \frac{d}{T_2 - T_1} \quad (5.9)$$

dengan,

d = jarak antar sensor,

$T_{1,2}$ = waktu kedatangan gelombang pada masing-masing sensor.

Gelombang tubuh Primer (P) dapat dihitung dan diturunkan dari hubungan antara kecepatan rambat gelombang R dan angka Poisson dengan persamaan berikut ini.

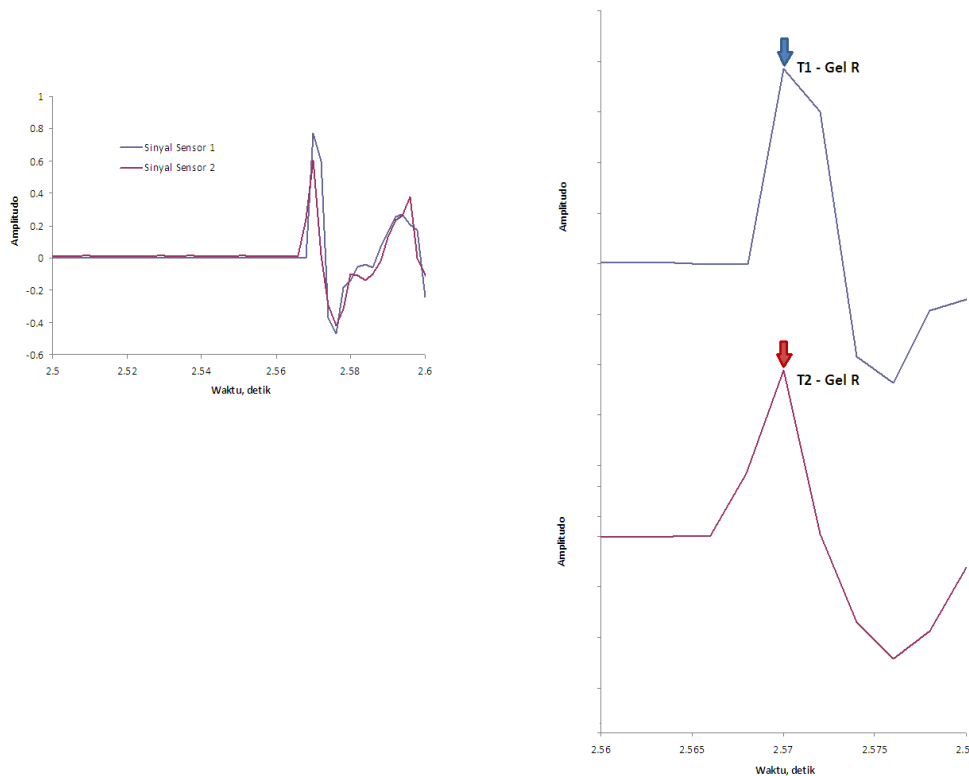
$$V_P = \frac{1 + \nu}{0,87 + 1,12\nu} \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)}} V_R \quad (5.10)$$

dengan,

ν = angka Poisson.

Dalam penelitian ini, angka Poisson untuk tanah ditentukan sebagai $\nu = 0,33$, maka persamaan 5.2 dapat disederhanakan menjadi:

$$V_P = 2,13V_R \quad (5.11)$$



Gambar 5.8 Data seismik tanah uji dan penentuan waktu kedatangan gelombang R pada sensor pertama dan kedua

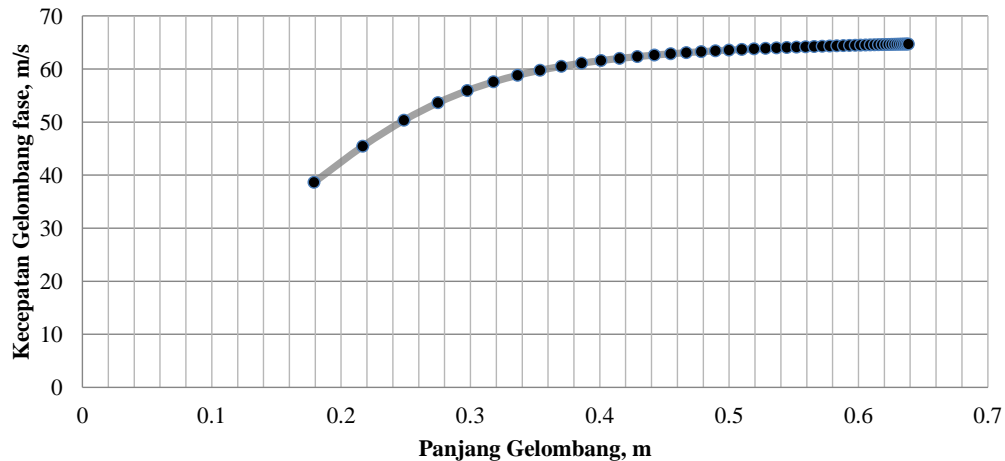
Dari Gambar 5.8 dapat ditentukan, waktu kedatangan gelombang R pada sensor 1, $T_1 = 2,5699$ detik dan pada sensor 2, $T_2 = 2,57055$ detik. Dengan jarak antar sensor (d), sebesar 4 cm (0,04 m) maka menggunakan persamaan 5.1, dapat ditentukan kecepatan gelombang R, $V_R = 61,54$ m/s. Selanjutnya kecepatan gelombang P, dapat diperoleh menggunakan persamaan 5.3 dengan $V_P = 131,1$ m/s.

2). Beda fase (*phase different method*)

Metode beda fase akan digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang menggunakan parameter waktu pergerakan gelombang. Waktu pergerakan gelombang (t) dapat dihitung menggunakan nilai beda fase (ϕ) dari spektrum gelombang fungsi transfer (*transfer function*) melalui proses FFT data seismik.

Gambar 5.9 merupakan hasil pengukuran data spektrum beda fase atau fungsi perpindahan dari data seismik sampel uji dan analisis kecepatan fase. Hasil perhitungan kecepatan gelombang fase atau gelombang permukaan R dari metode beda fase dan metode beda waktu rambat terlihat tidak jauh berbeda. Rata-rata nilai kecepatan fase dari kurva dispersi menghasilkan $V_R = 62,08$ m/s, atau berbeda

sebesar 0,87 % dengan metode beda waktu rambat ($V_R = 61,54$ m/s). Selanjutnya kecepatan gelombang P, dapat diperoleh menggunakan persamaan 5.3 dengan $V_P = 132,23$ m/s.



Gambar 5.9. Kurva dispersi kecepatan gelombang fase untuk sampel uji

Untuk perhitungan selanjutnya, dalam penelitian ini digunakan metode beda waktu rambat. Analisis dilakukan untuk seluruh data hasil pengukuran seismik untuk variasi kadar air pada sampel uji tanah dan variasi kepadatan tanah.

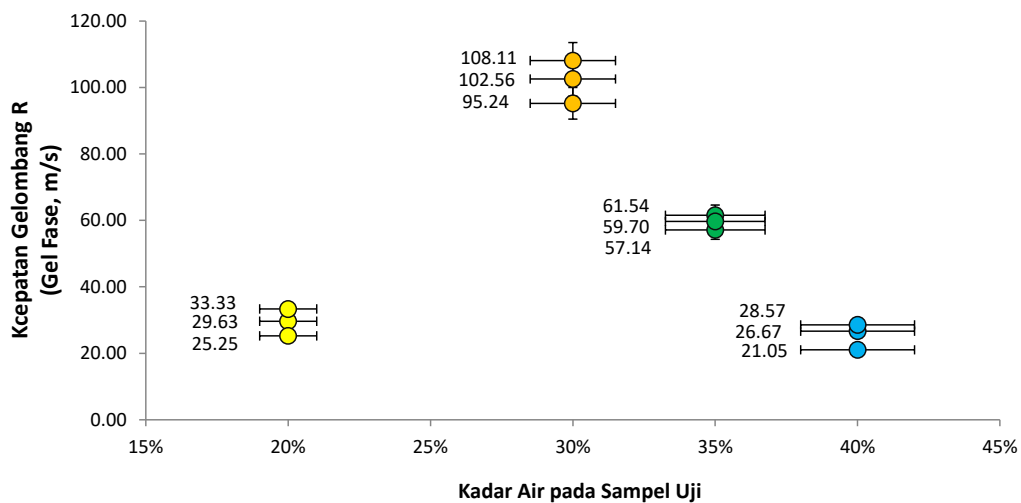
5.4 Hasil Analisis Kecepatan Gelombang Fase dengan Variasi Kadar Air dan Kepadatan Tanah

5.4.1 Hubungan antara Kecepatan Gelombang Seismik dan Variasi Kadar Air Tanah

Hasil analisis gelombang seismik pada sampel uji dengan variasi kadar air 25 %, 30 %, 35 % dan 40 % diberikan dalam Tabel 5.1 dan plot hubungan data diberikan dalam Gambar 5.10. Dari gambar tersebut terlihat bahwa peningkatan kadar air pada sampel tanah dapat dideteksi dengan jelas oleh perubahan kecepatan gelombang fase.

Tabel 5.1. Hasil analisis pengukuran seismik (V_R , V_P dan V_S) pada sampel uji variasi 25, 30, 35 dan 40 %

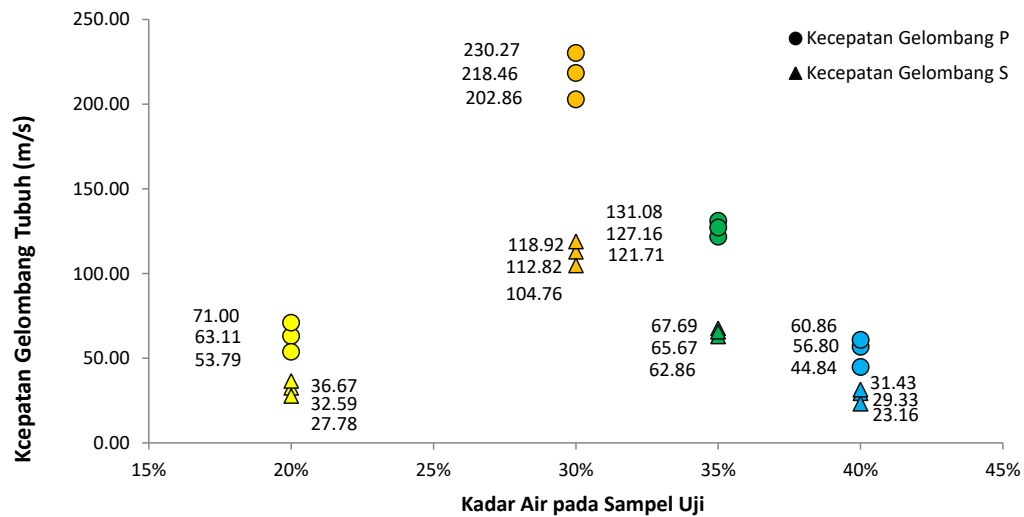
Kadar Air %	V_R m/s	V_P m/s	V_S m/s
20%	29,63	63,11	32,59
	33,33	71,00	36,67
	25,25	53,79	27,78
30%	102,56	218,46	112,82
	95,24	202,86	104,76
	108,11	230,27	118,92
35%	61,54	131,08	67,69
	57,14	121,71	62,86
	59,70	127,16	65,67
40%	26,67	56,80	29,33
	21,05	44,84	23,16
	28,57	60,86	31,43



Gambar 5.10. Hubungan antara kecepatan gelombang fase pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air

Semakin tinggi kadar air, nilai cepat rambat gelombang permukaan semakin tinggi, hingga mencapai suatu titik optimum. Selanjutnya nilai kecepatan gelombang semakin rendah searah dengan penambahan kadar air pada sampel tanah uji setelah mencapai titik optimum. Demikian juga, hasil yang sama ditunjukkan dari hubungan antara kecepatan gelombang tubuh P dan S terhadap kenaikan kadar air. Gambar 5.11

menunjukkan perubahan kecepatan gelombang P dan S terhadap perubahan kadar air pada sampel uji.

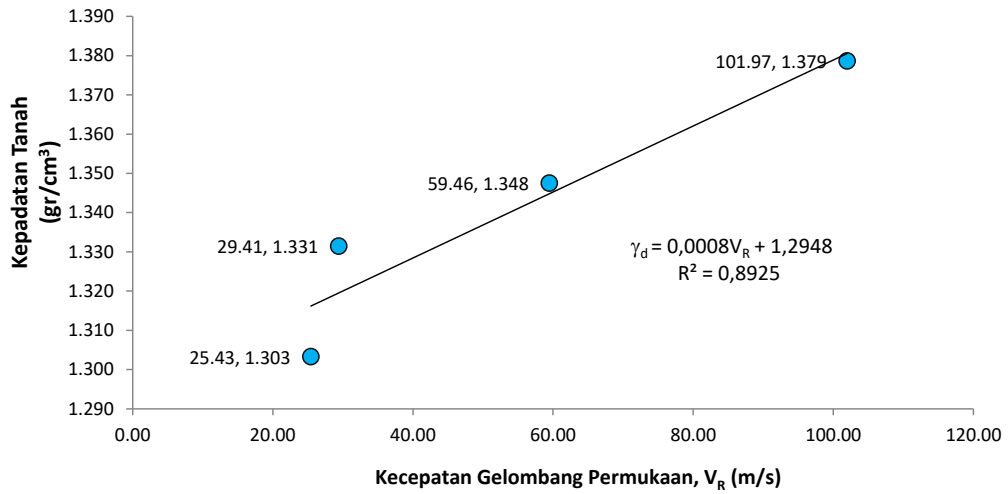


Gambar 5.11. Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh P dan S pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air

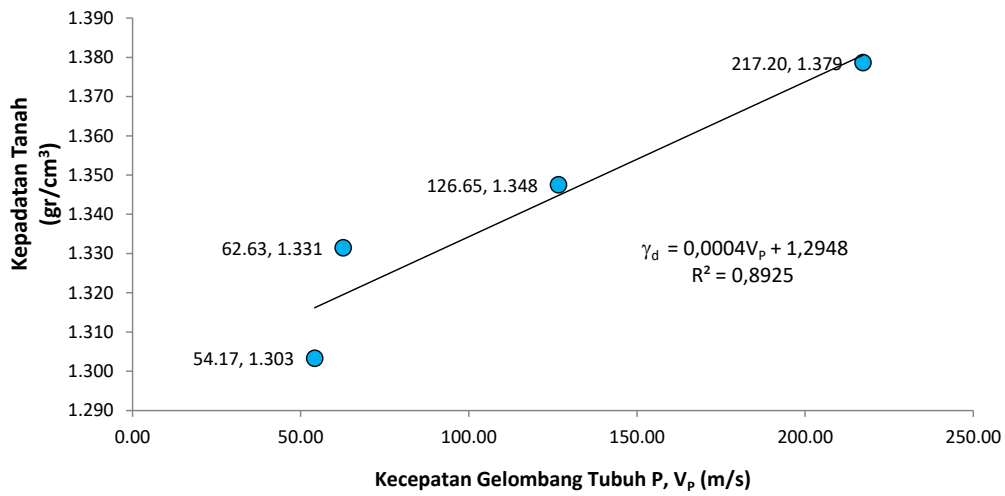
Meskipun secara langsung, gelombang permukaan tidak dapat mendeteksi keberadaan kadar air, namun dengan penambahan air pada sampel tanah yang dipadatkan akan mengakibatkan perubahan kepadatan (*dry density*). Perubahan kepadatan akan berpengaruh kepada perubahan kekakuan bahan (modulus elastisitas). Perubahan kekakuan ini yang menyebabkan nilai kecepatan gelombang menjadi semakin meningkat.

5.4.2 Hubungan antara Kecepatan Gelombang Seismik dan Kepadatan Tanah

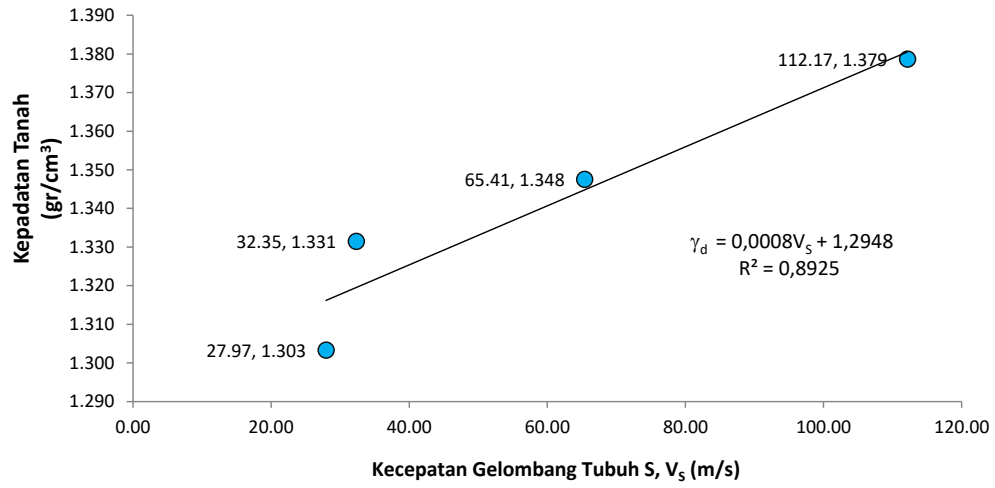
Hubungan antara kecepatan gelombang seismik (permukaan dan tubuh) dari analisis gelombang seismik pada sampel uji terhadap kepadatan tanah yang dihasilkan dari variasi kadar air 25 %, 30 %, 35 % dan 40 % diberikan dalam Gambar 5.12 sampai dengan Gambar 5.14. Kecepatan gelombang seismik yang ditentukan dari kecepatan rata-rata dari beberapa pengukuran seismik pada sampel tanah. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan kepadatan yang meningkat, kecepatan gelombang pun akan semakin meningkat.



Gambar 5.12. Hubungan antara kecepatan gelombang permukaan pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air



Gambar 5.13. Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh P pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air



Gambar 5.14. Hubungan antara kecepatan gelombang tubuh S pada sampel uji tanah dengan variasi kadar air

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Suatu teknik baru yang disebut sebagai *Portable Surface Waves Analyser* (PSWA) untuk evaluasi kepadatan tanah dasar perkerasan jalan di Indonesia telah dihasilkan dalam penelitian ini. Dalam penelitian ini, sistem dan instrumen pengukur laboratorium dan lapangan PSWA telah dihasilkan. Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa kesimpulan dapat diberikan sebagai berikut:

1. Teknik *Portable Surface Waves Analyser* (PSWA) dapat mendeteksi pergerakan gelombang seismik menggunakan instrumen sensor dan ADC yang selanjutnya digunakan untuk menganalisis cepat rambat pergerakan gelombang seismik baik gelombang permukaan maupun gelombang tubuh P dan S.
2. Teknik PSWA dapat mendeteksi cepat rambat gelombang pada sampel uji laboratorium dengan variasi kadar air 25 %, 30 %, 35 % dan 40 %. Konfigurasi pengukuran yang digunakan adalah dual-sensor dengan sumber gelombang mekanik sebagai pembangkit gelombang mekanik.
3. Nilai kepadatan tanah dasar dapat dideteksi dengan menghasilkan hubungan empirik sebagai berikut:
 - a. $\gamma_d = 0,0008 V_R + 1,2948$
 - b. $\gamma_d = 0,0004 V_P + 1,2948$
 - c. $\gamma_d = 0,0008 V_S + 1,2948$

6.2 SARAN

Studi ini merupakan penelitian aplikatif berkelanjutan untuk menghasilkan sistem, teknik dan instrumen terpadu untuk evaluasi jalan di Indonesia. Beberapa kegiatan penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk memastikan teknik ini dikembangkan dengan baik dengan berbagai penyesuaian lingkungan dan kondisi perkerasan jalan di Indonesia. Beberapa rekomendasi dan saran diberikan untuk kelanjutan penelitian ini, diantaranya:

1. Analisis tegangan-regangan perlu dilakukan supaya mengetahui dengan tepat tingkat regangan bahan yang dihasilkan pada saat uji seismik pada sampel

tanah dasar perkerasan jalan. Dengan mengetahui tingkat regangan ini, hubungan konstitutif dari teknik PSWA dan CBR-daya dukung tang dapat dibangun.

2. Perlu dicoba untuk jenis tanah yang lain supaya menghasilkan model empirik untuk model tanah umum.

DAFTAR PUSTAKA

- Cho, Y.S. 2002. NDT Response of spectral analysis of surface wave method to multi-layer thin high strength concrete structure, *Ultrasonic* **2336**.
- 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.
- 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*.
- Gucunski, N. Ganji, V. & Maher, M.H. 1996. Effect of soil non homogeneity on SASW testing. *Geotechnical Special Publication*, American Society of Civil Engineer **58**: 1083-1097.
- 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
- Lakip Ditjen Bina Marga. 2011. Laporan Kinerja Perusahaan. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Perhubungan. Tidak Dipublikasikan.
- 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*: 1-13.
- Nazarian, S. 1984. In situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave method. Disertasi Ph.D. The University of Texas at Austin.
- Nazarian, S. & Stokoe II, K. H. 1984. In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. *Proc. of 8th World Conf. on Earthquake Engineering* **3** : 31-38
- 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.
- Rosyidi, S.A. 2004. *Evaluation of Dynamic Stiffness of Pavement Material using SASW Method*. Master Thesis. Universiti Kebangsaan Malaysia. 210 pp.
- Rosyidi, S.A. 2005. Studi Pengukuran Modulus Elastisitas Dinamik Lapangan pada Bahan Perkerasan Jalan Menggunakan Teknik Spektrum Gelombang Seismik (Studi Kasus pada Jalan Nasional Piyungan – Gading). Laporan Penelitian Kopertis Wilayah V Yogyakarta.
- Rosyidi, S.A. 2007. Comparison Between 2-D and 3-D Stiffness Matrix Model Simulation of SASW Inversion for Pavement Structure Civil Engineering Dimension, *Journal of Civil Engineering Science and Application*, Vol. 9, No. 1, March 2007: pp. 42-48.
- Rosyidi, S.A. 2009. Wavelets Model of Surface Waves Analysis on Selected Geotechnical Earthquake Problems. Ph.D Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A. 2010. Contribution of Integrated Geophysical Surveys for Site Investigation in Geohazards Analysis. International Conference on Sustainable Built Environment 2010, Yogyakarta, Indonesia 27-29 May 2010.
- Rosyidi, S.A. 2012. Use of Wavelet Analysis and Filtration on Impulse Response for SASW Measurement in PCC Slab of Pavement Structure, *Contemporary Topics on Testing, Modeling, and Case Studies of Geomaterials, Pavements, and Tunnels*, Geotechnical Special Publication 215, pp. 74-82.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2005. 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. & Taha, M.R. 2004a. Measurement of Pavement Moduli using Simple Surface Wave Propagation Technique *The 7nd Symposium of Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi (FSTPT)*. Catholic Parahyangan University. 11 September 2004.
- Rosyidi, S.A, Nayan, K.A.M & Taha, M.R. 2004b. Measurement of Subgrade Stiffness using the SASW Method. Malaysian Geotechnical Conference at Petalingjaya Kuala Lumpur, 14-16 Maret 2004. The Institute of Engineer Malaysia.
- 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. Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7 pada tanggal 7 – 10 Oktober 2003. Himpunan Pengembang Jalan Indonesia (HPJI). Jakarta.

- 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 (FSTPT)*. Universitas Indonesia
- 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 & 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. & Siegfried. 2010. Kinerja dan verifikasi terhadap modulus elastisitas tanah dasar dari pengukuran teknik seismik gelombang permukaan. *Jurnal Semesta Teknik*, Vol.13., No.1: 62-76
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R., Chik, Z. & Ismail, A. 2008. Seismic response identification of surface waves on residual soils using wavelets analysis. *Proc.International Conference in Geotechnical and Highway Engineering, Geotropika 2008*, Kuala Lumpur Malaysia.
- Rosyidi, S.A., Abiss, C.P., Nayan, K.A.M., Taha, M.R., Chik, Z. & Ismail, A. 2012. Study of the relationship between stiffness parameters for base materials. *The ICE – Transport Journal, Institution of Civil Engineers*, 165(TR3) : 159–165.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R., Ismail, A. & Chik, Z. 2009. Signal reconstruction of surface waves on SASW measurement using gaussian derivative wavelet transform. *Acta Geophysica*, Vol. 57 No.3: 616-635.
- Stokoe II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A. & Rössset, J.M. 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. In : Woods, R.D. editor. *ISSMFE Technical Committee 10. XIII ICSMFE*. New Delhi. India
- 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

LAMPIRAN I
INSTRUMEN DUKUNGAN PADA PELAKSANAAN PENELITIAN

- Analog Digital Converter (ADC) untuk menganalisis data analog ke digital, alat ini mendukung 15 % penelitian.
- Penganalisis Spektrum Gelombang dalam komputer. Alat ini mendukung 15 % kegiatan penelitian, sebagai peralatan ukur cepat rambat gelombang yang akan dihasilkan dari penelitian ini.
- Sensor geofon/geophones dengan kapasitas respon 4,5 Hz. Alat ini mendukung 20 % kegiatan penelitian, sebagai peralatan kalibrator sistem penerima alat ukur cepat rambat gelombang yang akan dihasilkan dari penelitian ini.
- Perangkat Lunak Matlab, Autosignal dan WinSASW versi 2.0.0 dari program penelitian milik laboratorium transportasi UMY. Software melakukan simulasi rambatan gelombang yang mendukung 20 % kegiatan penelitian.
- CBR Lapangan dan peralatan pengujian mekanika tanah milik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Alat ini mendukung 30 % kegiatan penelitian.

Lampiran II : Susunan Organisasi

Susunan Organisasi Peneliti Tahun Pertama

Nama	Peran dalam Penelitian	Tugas dan Tanggungjawab
Sri Atmaja PJNRR, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.	Ketua Peneliti	Merencanakan kegiatan penelitian, membuat disain sistem dan instrumentasi alat ukur cepat rambat gelombang, menyiapkan pemrograman, menganalisis hasil dan verifikasi data.
Slamet Riyadi, ST., M.Sc., Ph.D.	Anggota 1	Menganalisis dan mensimulasi sistem instrumentasi, menyiapkan fabrikasi alat instrumentasi, menyiapkan pemrograman.
Ir. Anita Widianti, MT.	Anggota 2	Menyiapkan pengujian tanah dasar dengan berbagai variasi kepadatan dan daya dukung, menyiapkan sampel tanah.

Susunan Organisasi Peneliti Tahun Kedua

Nama	Peran dalam Penelitian	Tugas dan Tanggungjawab
Sri Atmaja PJNRR, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.	Ketua Peneliti	Merencanakan kegiatan penelitian, membuat disain sistem dan instrumentasi alat ukur cepat rambat gelombang di lapangan (PSWA), menyiapkan pemrograman, menganalisis hasil dan verifikasi data dan menganalisis data pembanding SASW dan MASW
Slamet Riyadi, ST., M.Sc., Ph.D.	Anggota 1	Menganalisis dan mensimulasi sistem instrumentasi, menyiapkan fabrikasi alat instrumentasi, menyiapkan pemrograman.
Ir. Anita Widianti, MT.	Anggota 2	Menyiapkan lokasi pengujian tanah dasar pada lokasi uji lapangan, melakukan analisis pengujian DCP-CBR pada lokasi uji.
Dr. Siegfried, M.Sc.	Anggota 3	Melakukan uji dan analisis pembanding LFWD pada lokasi uji lapangan

BIODATA

KETUA PENELITI

Nama dan Gelar : Sri Atmaja Putra J N N R, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIDN : 0515047801
NIK : 19780415200004 123046
Pangkat/Gol. : Penata Tk. I/IIIId
Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
Alamat Rumah (lengkap) : Jalan Demakan Baru TR.III/773A, RT.34/RW.09,Tegalrejo,
Yogyakarta 55244
Telepon Rumah : 0274-5304871
Nomor HP : 0815 790 9887
Faksimili Rumah : ---
Email Pribadi : atmaja_sri@umy.ac.id / atmaja.sri@gmail.com
Alamat Kantor (lengkap) : Jalan Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul,
Yogyakarta, 55183
Telepon Kantor : 0274-387656 (110)
Faksimili Kantor : 0274-387646

Riwayat Pendidikan

Tahun lulus	Perguruan Tinggi	Bidang Spesialisasi
S-1	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta	Teknik Sipil (Transportasi)
S-2	the National University of Malaysia	Teknik Sipil (Transportasi)
S-3	the National University of Malaysia	Teknik Sipil (Geo-Pavement)

Pengalaman Penelitian 5 (Lima) Tahun Terakhir

Tahun	Topik/Judul Penelitian	Sumber Dana
2009	Development of tomography surface wave analysis for engineering assessment of geotechnical structures	Ministry of Science, Technology and Innovation, Malaysia No.01-01-02-SF0338
2009-2010	Pengembangan Teknik Pengukuran Lapangan Terpadu Seismik dan Geo-Listrik untuk Pengukuran Potensi Likuifaksi pada Tanah Berpasir dan Lokasi Patahan	Hibah Bersaing, Dikti
2009	Pembangunan Sistem Spektrum Tomografi Gelombang Permukaan untuk Mendeteksi Kekuatan dan Anomali Perkerasan Jalan	Hibah Bersaing, Dikti
2010 – 2011	Ground response analysis of soils column by dynamic loadings	Ministry of Higher Education, Malaysia

2013	Pengembangan Fondasi Perkerasan Lentur Jalan dengan Kolom Eco Si-CC Pada Tanah Ekspansif	Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi, Hibah Desentralisasi Dikti
------	---	--

Pengalaman Publikasi di Berkala Ilmiah 5 (Lima) Tahun Terakhir

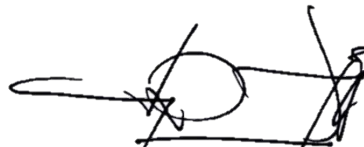
Nama (-nama) penulis	Tahun terbit	Judul artikel	Nama berkala	Volume dan halaman
S.A.P.J.N.N. Rosyidi, C.P.Abbiss, K.A.M. Nayan, M.R. Taha, Z. Chik & A. Ismail	2012	Empirical study on VS-CBR-DCP relationship for the stiffness of unbound granular base layer.	The ICE – Transport Journal, Institution of Civil Engineers, ISSN: 0965-092X, E-ISSN: 1751-7710 (SCOPUS/ISI IF: 0.174)	Volume 165 August 2012 Issue TR3 Pages 159–165 http://dx.doi.org/10.1680/tran.10.00010
Sri Atmaja P. Rosyidi, Fahmi Aldiamar, Nazib Faizal and Mohd. Raihan Taha	2011	Lesson Learned from Road Infrastructure Deterioration Caused by Earthquake 7.6 MW and 6.2 MW Padang, September 30, 2009.	Geotechnical Special Publication ASCE	Vol. 217, pp. 180-187 http://dx.doi.org/10.1061/47628(407)23
Sri Atmaja P. Rosyidi	2011	Use of Wavelet Analysis and Filtration on Impulse Response for SASW Measurement in PCC Slab of Pavement Structure	Geotechnical Special Publication ASCE	Vol. 215, pp. 74-82 http://dx.doi.org/10.1061/47626(405)10
S.A.P.J.N.N. Rosyidi, T.A. Jamaluddin, L.C. Sian, M.R. Taha	2011	Impact of 7.6 Mw Earthquake, Padang Indonesia, 30 September 2009.	Journal of Sains Malaysiana (SCOPUS/ISI IF 0.152)	Vol. 40, No.12, December 201, pp. 1393-1405
Z.Chik, T. Islam, M.M. Mustafa, H. Sanusi, S.A.P.J.N.N Rosyidi & M.R. Taha	2009	Surface Wave Dispersive Analysis Using Morlet Wavelet in Geotechnical Investigations	Journal of Applied Sciences	Vol. 9 No.19, pp.3491-3501.
Z.Chik, T. Islam, S.A. Rosyidi, H. Sanusi, M.R. Taha, M.M. Mustafa	2009	Comparing the Performance of Fourier Decomposition and Wavelet Decomposition for Seismic Signal Analysis	European Journal of Scientific Research	Vol.32 No.3 (2009), pp.314-328
S.A.P.J.N.N Rosyidi, M.R. Taha, A. Ismail & Z. Chik	2009	Signal reconstruction of surface waves on SASW measurement using gaussian derivative wavelet transform	Acta Geophysica, (Impact Factor 2009: 0.882)	Vol. 57 No.3 (September 2009), pp.616-635, DOI: 10.2478/s11600-009-0015-8.

S.A. Rosyidi, M.R. Taha, A. Ismail and Z. Chik	2009	Evaluation of Pavement Subgrade Quality using the Spectral Analysis of Surface Wave Method	Journal of Sains Malaysiana	Vol. 38, No. 1, February 2009
--	------	--	------------------------------------	-------------------------------

Pengalaman Menulis Buku 10 (Sepuluh) Tahun Terakhir

Nama	Judul Buku	Tahun	Penerbit	ISBN
Sri Atmaja P. Rosyidi	Rekayasa Jalan Kereta Api	2014	LP3M	978-979-98053-9-3
Sri Atmaja P. Rosyidi	Metode Analisis Gelombang Permukaan untuk Penyelidikan Sub-Permukaan	2013	LP3M	978-602-7577-24-4

Yogyakarta, Tanggal 24 April 2014



(Sri Atmaja P J N R)

Biodata Ketua / Anggota Tim Peneliti / Pelaksana

A. Identitas Diri

1	Nama Lengkap (<i>dengan gelar</i>)	Slamet Riyadi, S.T., M.Sc., Ph.D.
2	Jenis Kelamin	Laki-laki
3	Jabatan fungsional	Lektor
4	NIP/NIK/Identitas lainnya	19780809200104123048
5	NIDN	0509087801
6	Tempat dan Tanggal Lahir	Sukoharjo, 9 Agustus 1978
7	E-mail	riyadi@umy.ac.id
8	Nomor Telepon/HP	08157917000
9	Alamat Kantor	Prodi Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul
10	Nomor Telepon/Fax	0274-387656/0274-387646
11	Lulusan yang Telah Dihasilkan	S-1= 5 orang; S-2= - orang; S-3= - orang
13	Mata Kuliah Yang Diampu	Mikrokontoler
		Sistem Kontrol Digital
		Dasar Jaringan Komputer
		Protokol Routing pada Jaringan Komputer
		Switching Jaringan dan Wireless
		Jaringan Area Luas
		Perancangan Antarmuka Manusia-Komputer

B. Riwayat Pendidikan

Strata	S-1	S-2	S-3
Nama Perguruan tinggi	Universitas Gadjah Mada	Universiti Kebangsaan Malaysia	Universiti Kebangsaan Malaysia
Bidang Ilmu	Teknik Elektro	Teknik Elektro	Teknik Elektro
Tahun Masuk-Lulus	1996 – 2000	2004 - 2008	2008 - 2012
Judul Skripsi/Thesis/Disertasi	Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Thyristor	Portable Instrument for Measuring Concrete Thickness based on Impact Echo Technique	Cardiac Motion Profiles based on Optical Flow
Nama Pembimbing/Promotor	Bambang Sutopo, MPhil Ir. Isnaeni	Prof. Mohd Marzuki Mustafa Khairul Anuar, MSc	Prof. Mohd Marzuki Mustafa Prof Aini Hussain

C. Pengalaman Penelitian Dalam 5 Tahun Terakhir

(Bukan Skripsi, Thesis, maupun Disertai)

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan	
			Sumber*	Jml (Juta Rp)
1	2008	An Automated Machine Vision Based for Fruit Size Grading System	Ministry of Science, Technology and Innovation, Malaysia	600
2	2008	Pembangunan Sistem Dan Instrumen Portable Multi-Channel Tomography Of Surface Waves (Pmtsw) Untuk Pengukuran Kekuatan Dan Anomali Struktur Perkerasan Jalan	DIKTI	48
3	2012	Ergonomic Improvement on Baby Support Pillow for Breastfeeding During Travelling	Ministry of Science, Technology and Innovation, Malaysia	300

**Tuliskan sumber pendanaan baik dari skema penelitian DIKTI maupun dari sumber lainnya*

D. Pengalaman Pengabdian Kepada Masyarakat Dalam 5 Tahun Terakhir

No	Tahun	Judul Pengabdian	Pendanaan	
			Sumber*	Jml (Juta Rp)
1	2012	Pengembangan Industri Olahan Ketela	UMY	7
2	2012	Pelatihan Aplikasi Komputer Perkantoran untuk Perangkat Desa Polengan, Srumbung, Magelang	Prodi TI UMY	2
3	2013	Talk: Monetize Twitter	Prodi TI UMY	2

**Tuliskan sumber pendanaan baik dari skema pengabdian kepada masyarakat, DIKTI, maupun dari sumber lainnya*

E. Publikasi Artikel Ilmiah Dalam Jurnal Alam Dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volum/ Nomor/ Tahun
1	Cardio-Spatial Profile Extraction using Optical Flow of Echocardiographic Images.	Lecture Note on Engineering and Computer Science	848 – 851 2009
2	Implementation of Differential Optical Flow in Natural Rigid Video Movement.	Lecture Note on Engineering and Computer Science	795 – 798 2009
3	Quasi-Gaussian DCT Filter for Speckle Reduction of Ultrasound Images.	Lecture Note on Computer Science	5857 136 – 147 2009
4	Construction and Analytical Application of a Microcontroller-based Portable Concrete Thickness Tester.	European Journal of Scientific and Research.	2009
5	Segmental Boundary Profile of Myocardial Motion to Localize Cardiac Abnormalities.	Lecture Notes in Engineering and Computer Science	2183 692 – 697 2010
6	Myocardial Motion Analysis of Echocardiography Images using Optical Flow Radial Direction Distribution	Journal of Computer Science	7(7) 1046 – 1051 2011
7	Myocardial Motion Estimation: An Evaluation of Optical Flow Computation Techniques on Echocardiographic Images	International Journal of Advance Science, Engineering and Information Technology	1(4) 395 – 398 2011
8	Divergence-based Segmental Profile of Myocardial Motion for the Detection of Cardiac Abnormality	Journal of Computational Information Systems	7(14) 5167 – 5176 2011
9.	Enhanced Optical Flow Field of Left Ventricular Motion Using Quasi-Gaussian DCT Filter	Advances in Experimental Medicine and Biology	696(6) 461 – 469 2011
10.	Enhanced Endocardial Boundary Detection in Echocardiography Images using B-Spline and Statistical Method	Advanced Science Letters	2014 (in publishing)

F. Pemakalah Seminar Ilmiah (*Oral Presentition*) dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Pertemuan Ilmiah / Seminar	Judul Artikel Ilmiah	Waktu dan tempat
1	5 th International Symposium on Mechatronics and its Applications	Wavelet-based Feature Extraction Technique for Fruit Shape Classification	2008 Amman, Jordan
2	3rd International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation	Myocardial motion analysis using modified radial direction distribution based on magnitude criteria	2012 Sabah, Malaysia
3	Visual Informatics International Seminar	New Method Based On Image Analysis Technique For Breastfeeding Posture Data Collection	2012 Selangor, Malaysia
4	International Conference on Engineering Education	Computer assisted learning using Matlab GUI for morphology simulation in digital image processing: a preliminary study	2013 Medinah, KSA

G. Karya Buku Dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Buku	Tahun	Jumlah Halaman	Penerbit
1	-			
2				

H. Perolehan HKI Dalam 5-10 Tahun Terakhir

No	Judul / Tema HKI	Tahun	Jenis	Nomor P/ID
1	Portable Instrument for Measuring Concrete Thickness based on Impact Echo Technique	2008	-	Pending
2	Ergonomic Nursing Support Pillow	2013	-	Pending

I. Pengalaman Merumuskan kebijakan Publik/Rekayasa Sosial Lainnya Dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul/Tema/Jenis Rekayasa Sosial Lainnya yang Telah Diterapkan	Tahun	Tempat Penerapan	Respon Masyarakat
1	-			
2				

J. Penghargaan Dalam 10 Tahun terakhir (Dari Pemerintah, Asosiasi atau Institusi lainnya)

No	Jenis Penghargaan	Institusi Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Bronze Medal (Pecipta 2013) – Image Analysis Technique for Collecting Breastfeeding Posture Data Collection.	Ministry of Education, Malaysia	2013
2	Silver Medal (Pecipta 2013) - Ergonomic Nursing Support Pillow	Ministry of Education, Malaysia	2013
2	Bronze Medal (ITEX 2014)- Computer Assisted Learning : Matlab Gui For Morphology Simulation	Malaysian Association of Research Scientists	2014

Semua data yang saya isikan tercantum dalam biodata ini adalah benar dan dapat dipertanggungjawabkan secara hukum. Apabila di kemudian hari ternyata dijumpai ketidaksesuaian dengan kenyataan, saya sanggup menerima sanksi.

Demikian biodata ini saya buat dengan sebenarnya untuk memenuhi salahsatu persyaratan dalam pengajuan Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi.

Yogyakarta, 25 April 2014

Penyusun,



(Slamet Riyadi, S.T., M.Sc., Ph.D.)

BIODATA

A. IDENTITAS DIRI

1.	Nama Lengkap (dengan gelar)	Ir. Anita Widianti, MT
2.	Jabatan Fungsional	Lektor Kepala
3.	Pangkat / Golongan	Pembina / IV a
4.	NIP	19650720 199403 2 001
5.	NIDN	0020076502
6.	No Sertifikasi Dosen	08234610121
7.	Tempat dan Tanggal Lahir	Salatiga, 20 Juli 1965
8.	Jenis Kelamin	Perempuan
9.	Alamat Rumah	Banyumeneng RT. 16 RW. 04 No. 469A, Banyuraden, Yogyakarta 55293
10.	Nomor Telepon	0274 - 616945
11.	Nomor HP	081 5689 3762
12.	Email	anita_widianti2@yahoo.co.id
13.	Fakultas / Jurusan	Teknik / Teknik Sipil
14.	Perguruan Tinggi	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
15.	Alamat Kantor	Jl. Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, DIY
16.	Nomor Telepon/Fax Kantor	0274 - 387656 / 387646
17.	Bidang Keahlian	Geoteknik
18.	Mata Kuliah yg diampu	1. Pengantar Geoteknik
		2. Perkuatan Tanah
		3. Perbaikan Tanah
		4. Metode Penelitian

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Program	S1	S2
2. Nama PT	Universitas Gadjah Mada	Universitas Gadjah Mada
3. Bidang Ilmu	Teknik Sipil - Transportasi	Teknik Sipil - Geoteknik
4. Tahun Masuk	1984	1998
5. Tahun Lulus	1989	2001
6. Judul Skripsi / Tesis	Kemiringan Melintang pada Perkerasan Jalan	Pengaruh Beban Dinamis terhadap Geotekstil Sebagai Filter pada Struktur Jalan
7. Nama Pembimbing	Ir. Suprpto Totomihardjo, M.Sc	Prof. Dr. Ir. Kabul Basah Suryolelono, Dip.H.E., DEA. Prof. Ir. Bambang Suhendro, M.Sc, Ph.D

C. PENGALAMAN PENELITIAN

No	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
1	2	3	4
1	2012	Perilaku Mekanika Tanah yang Diperkuat dengan Serat dan Stabilisasi Bahan Semen (<i>Cemented Materials</i>)	Hibah Fundamental Dikti
2	2012	Pengaruh Jumlah Lapisan dan Spasi Perkuatan Geotekstil terhadap Kuat Dukung Ultimit dan Penurunan Tanah Lempung lunak	LP3M UMY
3	2011	Pengaruh Ukuran Benda Uji terhadap Kuat Tarik-Belah pada Tanah yang Distabilisasi dengan Kapur dan Diperkuat dengan Serat Plastik	LP3M UMY
4	2009	Perbaikan Sifat Mekanis Batu Bata Tanpa Dibakar dengan Campuran Limbah Karbit dan Abu Sekam Padi	LP3M UMY
5	2009-2010	Pengembangan Teknik Pengukuran Lapangan Terpadu Seismik dan Geo-Listrik untuk Pengukuran Potensi Likuifaksi pada Tanah Berpasir dan Lokasi Patahan	Hibah Bersaing XV Dikti
6	2006-2007	Penggunaan Sampah Plastik dan Campuran Kapur-Abu Sekam Padi Untuk Bahan Embankment Jalan Raya	Hibah Bersaing XIV Dikti
7	2000-2001	Pengaruh Beban Dinamis Terhadap Geotekstil Sebagai Filter pada Struktur Jalan	BPPS
8	1998-2000	Pengaruh Gradasi dan Persentase Campuran Pasir Sungai terhadap Perbaikan Sifat Tanah Lempung	FT UMY
9	1996-1997	Perbaikan Kualitas Agregat dengan Pelapisan Mortar Semen Portland.	FT UMY

1	2	3	4
10	1995-1996	Pengaruh Trap Void Uji Marshall Prosedur SNI 1990 pada Lapis Atas Aspal Beton dan Aspal Beton.	FT UMY

D. PENULISAN ARTIKEL ILMIAH

1. Widianti, A. (2013). Studi Model Perkuatan Geotekstil Teranyam dengan Nilai Kuat Tarik Bervariasi di Atas Tanah Lempung Lunak, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil III 2013*, 21 Mei 2013, Surakarta.
2. Widianti, A., Azmania dan Thirayo, B.K. (2013). Pengaruh Ukuran dan Kedalaman Geotekstil Anyaman Tipe HRX200 Terhadap Daya Dukung Ultimit dan Penurunan Tanah Lempung Lunak, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, Vol. 16, No.1, Mei 2013, ISSN 1411-061X.
3. Muntohar, A.S., Widianti, A., Hartono, E., dan Diana, W. (2012). Engineering Properties of a Waste Plastic Fibers Reinforced and Lime-Rice Husk Ash Stabilized Silty Soil, *Journal of Materials in Civil Engineering American Society of Civil Engineer (ASCE)*, August 2012.
4. Widianti, A. (2012). Pengaruh Jumlah Lapisan dan Spasi Perkuatan Geosintetik terhadap Kuat Dukung dan Penurunan Tanah Lempung Lunak, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, Vol. 15, No.1, Mei 2012, ISSN 1411-061X, halaman 90 – 97.
5. Supriyadi, J., Widianti, A. (2011). Interpretasi Letak Bidang Longsor dan Faktor Aman Lereng dengan Bahasa Pemrograman MATLAB, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, Vol. 14, No.2, November 2011, ISSN 1411-061X, halaman 186 – 197.
6. Widianti, A. (2009). Peningkatan Nilai CBR Laboratorium Rendaman Tanah dengan Campuran Kapur, Abu Sekam Padi dan Serat Karung Plastik, *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, Vol. 12, No.1, Mei 2009, ISSN 1411-061X, halaman 21 – 27.
7. Widianti, A., Hartono, E. dan Muntohar, A.S. (2009). Kuat Tekan dan Kuat Tarik Tanah dengan Campuran Kapur - Abu Sekam Padi – Serat Karung Plastik, *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 3*, Universitas Pelita Harapan Jakarta, 6 - 7 Mei 2009.
8. Widianti, A., Hartono, E. dan Muntohar, A.S. (2009). Studi Model Embankment Tanah Lempung dengan Stabilisasi Kapur - Abu Sekam Padi dan Serat Karung Plastik yang Dicampur Dalam Berbagai Konfigurasi, *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 3*, Universitas Pelita Harapan Jakarta, 6 - 7 Mei 2009
9. Muntohar, A.S., Widianti, A., Hartono, E., Diana, W. dan Oktoviar, E. (2008). Aplikasi Teknik Kolom-Semen (Cement-Column) pada Tanah Berpasir, *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II*, Universitas Lampung, 17-18 November 2008.
10. Widianti, A., Hartono, E. dan Muntohar, A.S. (2008). Uji Triaksial Unconsolidated Undrained Campuran Tanah Lanau dan Kapur – Abu Sekam Padi dengan Inklusi Serat Karung Plastik, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknik*, Vol. 11 No.2, November 2007.
11. Purnomo, A., Rosyidi, S.A.P.J.N.N, dan Widianti, A. (2008). Investigasi Sub-Permukaan Tanah Untuk Perencanaan Jalan Menggunakan Survai Pembiasan Seismik, *Prosiding Simposium XI Forum Studi Transportasi Antar Perguruan Tinggi, FSTPT*, Universitas Diponegoro Semarang, 29 – 30 Oktober 2008.

12. Widiанти, A., Hartono, E. dan Muntohar, A.S. (2008). Studi Model Embankment Tanah dengan Campuran Kapur - Abu Sekam Padi dan Serat Karung Plastik, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi B "Dinamika Teknik Sipil UMS"* Vol 8, No. 2, Juli 2008.
13. Widiанти, A., Hartono, E. dan Muntohar, A.S. (2007). Kekuatan Geser Campuran Tanah – Kapur - Abu Sekam Padi dengan Inklusi Kadar Serat Karung Plastik yang Bervariasi, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknika*, Vol. 10 No.1, Mei 2007.
14. Widiанти, A., Diana, W. dan Wahyudi, D. (2005). Perancangan Fondasi Pada Tanah Timbunan Sampah (Studi Kasus di Tempat Pembuangan Akhir Sampah Piyungan, Yogyakarta), *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknika*, Vol. 8 No.1, Mei 2005.
15. Hardwiyono, S, dan Widiанти, A. (2004). Pemanfaatan batu gamping keprus sebagai campuran agregat pada lapisan fondasi agregat kelas B, *Prosiding Simposium VII FSTPT*, 11 September 2004, Bandung.
16. Setyawan, R.N., dan Widiанти, A. (2004). Pengaruh penambahan limbah karbit terhadap nilai parameter kuat geser tanah lempung, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknika*, Vol. 7 No.1, Mei 2004.
17. Abidin, Z., dan Widiанти, A. (2002). Pengaruh waktu pemeraman terhadap sifat fisis tanah lempung Ngramang dengan bahan tambah limbah karbit, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknika*, Vol. 5 No.3, Nopember 2002.
18. Widiанти, A. (2002). Pengaruh persentase dan gradasi pasir sungai terhadap perbaikan sifat tanah lempung (Studi kasus tanah lempung di Kasihan, Bantul), *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Semesta Teknika*, Vol. 5 No.2, Juli 2002.
19. Widiанти, A., Suryolelono, K.B., dan Suhendro, B. (2002). Pengaruh beban dinamis terhadap fungsi filter geotekstil yang diletakkan di atas subgrade struktur jalan, *Jurnal Ilmiah Terakreditasi Media Teknik UGM*, No. 2 Tahun XXIV, Mei 2002.
20. Hantoro, G., dan Widiанти, A. (1999), Karakteristik agregat kasar dengan dilapisi mortar, *Jurnal Wahana Teknik*, Vol. 1 No. 2, Agustus 1999.
21. Widiанти, A. (1999). Penggunaan geosintetik sebagai bahan drainase vertikal, *Jurnal Semesta Teknika*, Vol.1 No. 1, Maret 1999.

E. KEGIATAN MENGIKUTI FORUM ILMIAH

No	Jenis Kegiatan	Kedudukan /Tingkat	Penyelenggara	Tanggal
1	2	3	4	5
1	Mengikuti Kuliah Umum “ Metode Perbaikan tanah lunak”	Peserta	UMY	6 Desember 2013
2	Mengikuti Kuliah Umum “Kerentanan Bangunan terhadap Gempa”	Peserta	UMY	28 November 2013
3	Mengikuti Seminar Nasional III Teknik Sipil 2013	Pembicara	UMS	21 Mei 2013
4	Mengikuti Workshop : "CDIO Workshop Part I : Introduction to CDIO Teaching and Learning Framework “.	Peserta	UMY	2 Februari 2013
5	Mengikuti “ Sosialisasi Standar Nasional Indonesia (SNI) Bidang Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil Untuk Kalangan Akademisi”	Peserta	Departemen Pekerjaan Umum	6 Desember 2012
6	Mengikuti “ Workshop Penyusunan Borang Akreditasi Program Studi Sarjana”	Peserta	UMY	19 Desember 2011
7	Mengikuti Workshop Nasional : “Strategi Promosi yang Kreatif”	Peserta	UMY	10 Oktober 2009
8	Mengikuti Lokakarya Nasional : “Pengelolaan Jurnal yang Memenuhi Standar & Tata Kelola Nasional”	Peserta	UMY	9 Oktober 2009
9	Mengikuti Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS) 3	Pembicara	UPH Jakarta	6-7 Mei 2009
10	Mengikuti Kegiatan Refreshing Al-Islam & Kemuhammadiyahahan Bagi Pimpinan & Dosen UMY.	Peserta	UMY	18 - 20 Juni 2008
11	Mengikuti Pelatihan : “Pemanfaatan Hasil Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Kreativitas Mahasiswa Berpotensi Paten”.	Peserta	UMY	13 - 15 Maret 2008
12	Mengikuti Konferensi Nasional Transportasi dan Geoteknik dalam Rekayasa Teknik Sipil.	Peserta	UNS	24 Februari 2007
13	Pemateri Pelatihan : “Metodologi Penelitian Tingkat Lanjut untuk Dosen Perguruan Tinggi Muhammadiyah”.	Pembicara	UMY	29 - 31 Agustus 2006

1	2	3	4	5
14	Mengikuti Seminar Nasional Geoteknik.	Peserta	JTS FT UGM	11 Juli 2006
15	Mengikuti Kursus Singkat : Al-Islam 1.	Peserta	UMY	18 Februari - 29 April 2006
16	Mengikuti Workshop : Lecturer Soft Skill Development Program	Peserta	UMY	21-22 Januari 2006
17	Mengikuti Seminar Nasional : Research Collaboration on Geotechnical Engineering	Peserta	Fakultas Teknik UMY	17 Desember 2004
18	Mengikuti Seminar Nasional : Kondisi dan Prospek Pengembangan Transportasi Darat di Indonesia	Peserta	Fakultas Teknik UMY	24 April 2004
19	Mengikuti Seminar Nasional Bidang Infrastruktur 2002	Pembicara	FT UMY	12 September 2002
20	Mengikuti Seminar Nasional Bidang Keteknikan 2001	Peserta	FT UMY	21 Februari 2001
21	Mengikuti Kajian Islam Intensif Dosen Tetap UMY	Peserta	LPPI UMY	10-11 Februari 2001
22	Mengikuti Seminar Nasional Geoteknik '99	Peserta	JTS FT UGM	8 November 1999
23	Mengikuti Workshop Kerja Praktek dan Tugas Akhir	Peserta	FT UMY	8 Mei 1999
24	Mengikuti Seminar Regional Antar PTS Kopertis Wilayah V DIY Bidang Teknik Sipil dan Arsitektur	Peserta	FT UMY	2 Mei 1998
25	Mengikuti Seminar Regional Antar PTS Kopertis Wilayah V DIY Bidang Teknik Sipil dan Arsitektur	Peserta	Universitas Kristen Immanuel	4 Oktober 1997
26	Mengikuti Seminar Regional Antar PTS Kopertis Wilayah V DIY Bidang Teknik Sipil dan Arsitektur	Peserta	Akademik Teknik YKPN	24 Agustus 1996
27	Mengikuti Seminar Regional Antar PTS Kopertis Wilayah V DIY Bidang Teknik Sipil dan Arsitektur	Peserta	FT UMY	27 April 1996
28	Mengikuti Diskusi Panel Alternatif jalan layang di Yogyakarta Dalam Tinjauan Ekonomi, Transportasi dan Sosial-Budaya	Peserta	UII	13 April 1996

1	2	3	4	5
29	Mengikuti Seminar Bulanan dosen Fakultas Teknik UMY	Pembicara	JTS FT UMY	Januari 1996
30	Mengikuti Seminar Regional Antar PTS Kopertis wilayah V DIY Bidang Teknik Sipil dan Arsitektur	Peserta	FTSP UII	23 Desember 1995
31	Mengikuti Seminar Keterkaitan Pola Pendidikan teknik Mesin Terhadap Kualifikasi Kebutuhan Sumber Daya Manusia dalam Era Industrialisasi	Peserta	UMY	29 Juli 1995
32	Mengikuti Lokakarya Program Pengembangan Ketrampilan Dasar Teknik Instruksional	Peserta	UMY	17-27 Juli 1995
33	Mengikuti Seminar Nasional : Manajemen Lalulintas yang Berwawasan Lingkungan	Peserta	UMY	5 Juni 1995
34	Mengikuti Seminar Hasil Penelitian	Peserta	Kopertis Wilayah V	31 Maret 1995
35	Mengikuti Seminar Hasil Penelitian	Peserta	Kopertis Wilayah V	25 Maret 1995
36	Mengikuti Pelatihan AutoCad	Peserta	UMY	2 - 8 Januari 1995
37	Mengikuti Penataran Metodologi Penelitian bagi Dosen PTS di Lingkungan Kopertis Wilayah V	Peserta	Kopertis wilayah V	1 - 4 Agustus 1994
38	Mengikuti Seminar Nasional dan Kursus singkat “ Bencana Alam dan Upaya Penanggulangannya	Peserta	PAU Ilmu Teknik UGM	18 - 22 oktober 1993
39	Mengikuti Seminar Nasional : Pembangunan yang Berwawasan Lingkungan dalam Proses Industrialisasi	Peserta	UMY	11 Oktober 1993

F. KEGIATAN PROFESIONAL / PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

No	Jenis Kegiatan	Tanggal
1	2	3
1	Perancangan Renovasi Sayap Selatan Masjid Al Asel di Perum Kanoman, Banyuraden, Gamping, Sleman.	2 September s/d 30 Desember 2013
2	Pengawasan Pembangunan Masjid Al-Furqon, Dusun Kadirojo, Desa Jamus Kauman, Kecamatan Ngluwar, Kabupaten Magelang.	1 Oktober 2012 s/d 5 Januari 2013
3	Perencanaan Masjid Al-Furqon, Dusun Kadirojo, Desa Jamus Kauman, Kecamatan Ngluwar, Kabupaten Magelang.	1 Oktober 2012 s/d 5 Januari 2013
4	Perencanaan Pembangunan Ruang Ketrampilan di Sekolah Luar Biasa Ganda Daya Ananda, Kadirojo, Purwomartani, Kalasan, Sleman.	Mei 2011 s/d Agustus 2011
5	Pelaksanaan Pembangunan Ruang Ketrampilan di Sekolah Luar Biasa Ganda Daya Ananda, Kadirojo, Purwomartani, Kalasan, Sleman.	Oktober 2011 s/d Desember 2011
6	Pembangunan Balai Dusun Pedukuhan I, Banyuraden, Gamping, Sleman.	3 Januari 2009 s/d 8 April 2009
7	Pelaksanaan Konstruksi Perkerasan Jalan di Pleret, Bantul.	15 Juli 2007 s/d 5 Agustus 2007
8	Pembangunan Jembatan Penghubung Desa Ngestiharjo, Kasihan, Bantul & Banyuraden, Gamping, Sleman.	17 Februari 2007 s/d 28 Mei 2007
9	Pelaksanaan Pembangunan Perluasan Masjid Tahap II Banyuraden, Gamping, Sleman.	31 Maret 2005 s/d 30 Juni 2005
10	Perancangan Teknik dan Pelaksanaan Pembangunan Perluasan Masjid Banyuraden, Gamping, Sleman.	28 Juni 2004 s/d 11 September 2004
11	Program Pengerasan Jalan dengan Conblock di Dusun Banyuraden, Gamping, Sleman	28 April 2004 s/d 13 Juni 2004
12	Perencanaan Pembangunan Gedung SD Muhammadiyah Ambarketawang, Gamping, Sleman.	30 September 2003 s/d 28 Desember 2003
13	Pembangunan Tempat Wudlu dan Kamar Mandi Masjid, Tamantirto, Kasihan, Bantul	30 September 2003 s/d 27 Desember 2003
14	Program Pengerasan Jalan dengan Conblock di Dusun Panggungan, Trihanggo, Gamping, Sleman	Juni s/d Agustus 2002
15	Perencanaan Teknik Perbaikan Jalan di dusun Dukuh, Donomulyo, Nanggulan, Kulon Progo	Juni 2000
16	Penyelidikan Tanah dan Perancangan Fondasi pada Pembangunan Sekolah Dasar Islam Terpadu Luqman al-Hakim Yogyakarta	29 November 1998 s/d 4 Januari 1999.

1	2	3
17	Pelaksanaan Konstruksi Water Tower, Fasilitas Wudlu dan Sumur Resapan di Dusun Kanggotan, Pleret, Bantul	28 November 1998 s/d 15 Desember 1998
18	Pangadaan Lapangan Badminton di Pakuncen, Wirobrajan, Yogyakarta	18-27 Mei 1997
19	Perencanaan dan Pelaksanaan Pembuatan Saluran air Minum / Instalasi Air bersih di Tritis, Girikerto, Sleman	20 Agustus s/d 10 Desember 1994

G. JABATAN DALAM PENGELOLAAN INSTITUSI

Peran/Jabatan	Institusi	Tahun
Ketua Program Studi	Teknik Sipil FT UMY	2013 - 2017
Sekretaris Program Studi	Teknik Sipil FT UMY	2011 - 2013
Bendahara	Forum Grup Diskusi Teknologi Perguruan Tinggi Muhammadiyah	2013 - 2015
Anggota	Tim Penilai Angka Kredit UMY	2013
Komisi I	Senat UMY	2011 - 2017
Sekretaris	Senat Fakultas Teknik UMY	2009 - 2013
<i>Tim Editor</i>	Jurnal ilmiah SemestaTeknika FT UMY	2014 - 2017
<i>Managing Editor</i>	Jurnal ilmiah SemestaTeknika FT UMY	2009 - 2014
Kepala	Laboratorium Mekanika Tanah	2008 - 2009
Kepala	Laboratorium Mekanika Tanah	1997 - 1998
Sekretaris	Lembaga Konsultasi dan Pelayanan Teknik (LKPT) FT UMY	1994 - 1998

H. PENGHARGAAN

Bentuk Penghargaan	Pemberi	Tahun
Tanda Kehormatan Presiden RI Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2012
<i>Teaching Award</i> bagi Pegawai Edukatif UMY	Rektor UMY	2011
Tim Pemantau Independen Ujian Nasional 2010	BSNP-TPI DIY	2010

Yogyakarta, 22 April 2014



Ir. Anita Widiyanti, MT

DRAFT PATEN

**METODE *INTEGRATED-SPECTRAL-ANALYSIS-OF-SURFACE-WAVE* (SASW) UNTUK EVALUASI
NILAI MODULUS ELASTISITAS STRUKTUR PERKERASAN JALAN DI INDONESIA**

Pencipta:

Assoc. Prof. Ir. Sri Atmaja P. Rosyidi, ST., M.Sc.Eng., Ph.D., P.Eng.

Ir. Dian Setiawan. M., S.T., M.Sc., Sc.

Deskripsi

METODE *INTEGRATED-SPECTRAL-ANALYSIS-OF-SURFACE-WAVE* (SASW) UNTUK EVALUASI NILAI MODULUS ELASTISITAS STRUKTUR PERKERASAN JALAN DI INDONESIA

Bidang Teknik Invensi

Invensi ini berhubungan dengan suatu model teknologi seismik berupa teknik *Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves* (*Integrated-SASW*) sebagai suatu pengujian lapangan untuk menilai struktural bahan jalan secara tidak merusak, cepat, akurat dan ekonomis yang digunakan di Indonesia.

Latar Belakang Invensi

Tujuan evaluasi perkerasan jalan adalah melakukan pengukuran kondisi perkerasan saat ini dan memprediksi depresiasi kekuatannya di masa yang akan datang. Berdasarkan data kekuatan struktur jalan, pihak pembina jalan dan insinyur lapangan mampu menentukan nilai sisa perkerasan jalan secara baik dan akurat. Kondisi bahan penyusun perkerasan jalan dalam konteks parameter kekuatan (modulus elastisitas) juga digunakan sebagai pertimbangan dalam pengambilan keputusan untuk pekerjaan-pekerjaan rehabilitasi jalan ataupun perencanaan ulang jalan. Hampir di seluruh Dinas Pekerjaan Umum di Indonesia masih bertumpu kepada metode konvensional laboratorium dan lapangan untuk evaluasi perkerasan jalan. Metode konvensional untuk pengukuran nilai struktural jalan yang ada dan dapat digunakan adalah metode Marshall dan modulus resilien (MR). Penggunaan metode Marshall dalam pengujian jalan telah dipergunakan secara meluas di Indonesia, meskipun demikian, terdapat kelemahan mendasar penggunaan metode ini untuk evaluasi kekuatan bahan jalan. Metode ini bertindak untuk mengukur respon bahan perkerasan (campuran aspal) pada kondisi plastis yang memenuhi kegagalan (failure). Kondisi ini tidak sesuai untuk menggambarkan perilaku pembebanan kendaraan pada perkerasan yang sebenarnya berada pada kondisi visko-elastik. Selanjutnya dikembangkan metode pengujian modulus resilien. Metode ini telah menyempurnakan sistem pembebanan pada metode Marshall dengan penggunaan beban impuls. Metode ini mampu mengukur respon bahan perkerasan dari campuran aspal hingga ke material

granular (untuk lapisan fondasi) dan tanah (untuk lapisan tanah dasar). Meskipun demikian, pengujian MR pada bahan granular masih melibatkan penggunaan tegangan bulk. Konsep ini merupakan faktor kelemahan pengujian MR karena tegangan bulk tidak bisa membedakan antara tegangan terkekang dan deviator. Sebagai tambahan lagi bahwa kedua metode ini memerlukan sampel lapangan dan hanya dapat diperoleh melalui pekerjaan pengeboran (*core drilling*). Pekerjaan sampel lapangan dan pengujian konvensional laboratorium ini menjadi tidak efektif dan tidak populer apabila jaringan jalan yang perlu dievaluasi panjang dan memiliki kondisi geologi dan geografis yang tidak seragam.

Metode konvensional berbasis lapangan yang ada adalah metode penetrasi kerucut ukur atau *dynamic cone penetrometer* (DCP) dan metode *Benkleman Beam* (BB). Meskipun metode DCP memiliki korelasi empiris langsung dengan CBR lapangan, namun penggunaan metode DCP merupakan metode destruktif sehingga untuk memperoleh daya dukung tanah suatu perkerasan jalan juga diperlukan pengeboran (*core drilling*) yang memerlukan waktu yang lama dan biaya yang relatif tinggi. Dengan demikian, dinilai dari segi efisiensi waktu dan biaya, metode DCP memiliki kelemahan fungsional. Untuk metode *Benkleman Beam*, penilaian evaluasi jalan berdasarkan nilai lendutan balik. Parameter ini tidak dapat secara langsung menggambarkan kondisi struktur perkerasan yang ada terutama kondisi daya dukung lapisan tanah dasar. Metode disain perkerasan ulang menggunakan data *Benkleman Beam* pun hanya diperuntukkan lapisan HRS saja.

Salah satu teknologi tanpa merusak untuk evaluasi perkerasan jalan yang dimiliki oleh Indonesia dalam penilaian kekuatan struktur jalan raya adalah alat uji pengukur defleksi dari beban jatuh atau *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Alat FWD ini merupakan instrumen lapangan yang memiliki ciri tidak merusak jalan, bekerja dengan cepat dan dapat memberikan output analisis berupa nilai modulus elastisitas setiap lapisan jalan. Secara konsepnya, alat FWD mengukur nilai lendutan atau defleksi merupakan respon balik akibat beban berat yang dijatuhkan di atas perkerasan. Dengan lima hingga tujuh sensor, FWD merekam setiap respon lendutan yang diberikan oleh lapisan perkerasan jalan hingga ke tanah dasar. Suatu metode perhitungan (*backcalculation*) perlu dijalankan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas di setiap lapisan perkerasan. Peralatan ini cukup inovatif karena mampu mereduksi pekerjaan evaluasi jalan di lapangan. Meskipun demikian, peralatan FWD ini sangat mahal harganya dan Kementerian Pekerjaan Umum hanya

memiliki peralatan FWD sejumlah 3 buah, sehingga sangat tidak dimungkinkan untuk melayani keseluruhan jaringan jalan di Indonesia. Selain itu, model aplikasi untuk analisis data FWD yang digunakan untuk interpretasi hasil akhir masih menunjukkan deviasi yang cukup besar. Ini disebabkan oleh model yang digunakan merupakan pengembangan kondisi lingkungan yang sangat berbeda dengan kondisi tropis di Indonesia dan model defleksi yang dikembangkan masih berlandaskan teori analisis defleksi statik, padahal kondisi yang perlu diperhitungkan adalah respon defleksi dinamik dari pembebanan statik. Melihat dari aspek ini, maka diperlukan pengembangan teknologi pemeliharaan jalan yang lebih representatif yang mampu menjadi alternatif dari pengujian FWD dimana lebih akurat, ekonomis dan tidak merusak jaringan jalan yang ada.

Salah satu metode NDT yang telah dikembangkan sejak tahun 1980 di University of Texas at Austin, Amerika Serikat adalah metode analisis spektrum gelombang permukaan atau *Spectral Analysis of Surface Wave*, SASW. Metode ini merupakan pengembangan teknologi dari metode keadaan mantap, *steady state method* (Jones, 1958), yang memanfaatkan perambatan gelombang permukaan dari sumber mekanik buatan untuk menilai kecepatan gelombang ricih yang merupakan representasi dari kekakuan (*stiffness*) suatu struktur. Keunggulan dari metode SASW ini adalah sifat pengujiannya yang tidak memberikan sebarang kerusakan pada struktur, metode ini murah dalam pelaksanaannya dan cepat untuk proses analisis hasilnya. Perkembangan metode SASW meliputi sejumlah pengujian dan riset yang telah dijalankan untuk berbagai jenis infrastruktur dan penggunaan teknik analisis yang diotomasi 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. Dalam studinya, hasil pengukuran SASW telah dibandingkan dengan pengujian lubang silang (*cross hole*) dan mendapati hasil pengujian SASW memiliki ketepatan yang tinggi. Pengujian yang sama juga telah dilakukan oleh Hiltunen & Woods (1988) yang menghasilkan korelasi yang memuaskan dari kedua metode pengujian. Penggunaan teknik SASW telah didapati berhasil untuk beberapa pengujian lapangan diantaranya studi karakteristik fondasi bangunan (Madhus & Westerdhal 1990; Stokoe et al. 1994), pengukuran lapangan nilai kekakuan tanah (Matthews et al. 1996), penilaian struktur beton (Rix et al. 1990; Cho 2002), pendeteksian lapisan pada struktur mortar semen (Cho et al. 2001), penilaian kepadatan suatu struktur

tanah timbunan (Kim et al. 2001) dan struktur fondasi (*ballast*) jalan kereta api (Zagyapan et al. 2002). Haupt (1977), Dravinsky (1983), Curro (1983) dan Gucunski et al. (1996, 2000) telah menunjukkan bahwa gelombang permukaan sangat sensitif kepada anomali (contohnya pengaruh keretakan dan lubang dalam struktur yang tidak homogen) yang terletak di permukaan suatu media. Hasil kajian tersebut menunjukkan potensi penggunaan SASW yang cukup luas untuk penilaian pemeliharaan suatu struktur. Pengembangan metode SASW di Indonesia belum pernah dilakukan studi dan aplikasi teknologi sebagai suatu metode penilaian struktur perkerasan jalan. Pengembangan SASW sangat berpotensi untuk dikembangkan di Indonesia, selain harga peralatannya yang relatif lebih murah, pemodelan untuk interpretasi data dapat menggunakan model dinamis perambatan gelombang sehingga hasil yang diperoleh lebih mendekati kepada kondisi sesungguhnya perilaku gelombang pada bahan perkerasan di lapangan. Pada invensi ini dilakukan evaluasi perkerasan jalan menggunakan metode SASW untuk struktur jalan di Indonesia. Invensi ini belum pernah dilakukan sebelumnya mengingat metode SASW merupakan teknologi jalan yang baru diperkenalkan di Indonesia oleh Rosyidi et al. (2002, 2003, 2004a, 2004b, 2005, 2006, 2007). Mengingat aspek ekonomis dan pengadaaan peralatannya yang lebih mudah, metode SASW juga dapat menjadi alternatif metode evaluasi perkerasan jalan selain penggunaan FWD.

Ringkasan Invensi

Invensi ini dimaksudkan untuk menyediakan suatu model teknologi seismik berupa teknik *Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW)* atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu sebagai suatu pengujian lapangan untuk menilai struktural bahan jalan (modulus elastisitas dan profil atau ketebalan setiap lapisan perkerasan pada perkerasan jalan) secara tidak merusak, cepat, akurat dan ekonomis yang digunakan di Indonesia.

Metode ini digunakan untuk mengukur kecepatan gelombang geser pada setiap lapisan perkerasan jalan. Selain mengkaji sistem SASW yang sesuai untuk implementasi di perkerasan jalan, juga dilakukan pengujian di atas model perkerasan jalan.

Model teknik *Integrated-SASW* yang sesuai dengan invensi ini mencakup model numeris dan analitis untuk mendapatkan model terbaik yang digunakan dalam analisis

SASW yang sesuai untuk kondisi lingkungan, jenis bahan dan struktur jalan serta komponen dasar instrumen atau sumber daya yang ada.

Kerangka pemodelan yang disusun berupa model pemrosesan sinyal linier, model pembangunan kurva dispersi, model analitis inversi 2-D, 3-D, dan FEM serta model fitting optimalisasi kurva dispersi teoritik dan eksperimen. Selanjutnya kerangka kedua adalah tahapan validasi dan kalibrasi model rencana dari kerangka pertama, diuji dalam model simulasi numeris dan analitis dan model fisik perkerasan jalan Indonesia.

Uraian Singkat Gambar

Gambar 1 adalah sistem profil model awal untuk proses simulasi 2 D dan 3 D pada profil artifisial reguler dan homogen.

Gambar 2 adalah layout model perkerasan.

Gambar 3 adalah model perkerasan jalan pada persiapan lapisan tanah dasar (a) dan pekerjaan pemadatan lapisan perkerasan (b).

Gambar 4 adalah hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan AC.

Gambar 5 adalah hasil rekaman sensor kedua untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan AC.

Gambar 6 adalah hasil IRF dan rekonstruksi spektrum fase untuk jarak 3 cm.

Gambar 7 adalah analisis kecepatan fase untuk jarak sensor 3 cm.

Gambar 8 adalah profil SMP yang diperoleh dari beberapa variasi rasio $H-\lambda$.

Gambar 9 adalah perbandingan kurva dispersi teori dari beberapa profil SMP terhadap kurva eksperimen pada model ATB.

Gambar 10 adalah profil SMP berdasarkan variasi rasio $H-\lambda$ dan nilai RMS yang dihasilkan.

Gambar 11 adalah konfigurasi sistem eksperimen SASW terpadu.

Tabel 1 adalah karakteristik lapisan pada sistem 1.

Tabel 2 adalah karakteristik lapisan pada sistem 2.

Tabel 3 adalah karakteristik lapisan pada sistem 3.

Uraian Lengkap Invensi

Model teknologi seismik berupa teknik *Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW)* atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang sesuai dengan invensi ini, dimaksudkan sebagai suatu pengujian lapangan untuk menilai struktural bahan jalan (modulus elastisitas dan profil atau ketebalan setiap lapisan perkerasan pada perkerasan jalan) secara tidak merusak, cepat, akurat dan ekonomis yang digunakan di Indonesia.

Dalam invensi ini, analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang sesuai dengan melakukan simulasi model 2 D dan 3 D pada struktur perkerasan jalan sebagai pendekatan untuk mendapatkan kurva dispersi kecepatan fase teori yang diperlukan dalam analisis SASW.

Pada bagian Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen, simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan pada model buatan (simulasi) atau disebut sebagai model artifisial yang memiliki karakteristik lapisan homogen atau memiliki sifat kekakuan bahan yang sama dan reguler atau teratur. Sistem pertama merupakan balok beton yang tersusun dalam tiga lapisan beton (Gambar 1) dengan karakteristik dinamik sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 1. Untuk sistem kedua disusun profil balok beton dengan sistem 5 lapisan, sedangkan sistem ketiga disusun dalam profil 6 lapisan (Gambar 1). Karakteristik dinamik untuk sistem kedua dan ketiga selengkapnya dijelaskan dalam Tabel 2 dan Tabel 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*).

Simulasi model 2 D dan 3 D yang dilakukan selanjutnya ialah pada model buatan (simulasi) atau disebut sebagai model artifisial 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 3.

Dalam bagian Model Artifisial Tidak Reguler (Teratur) dan Heterogen, 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 Imajiner berdomain spasial. Melalui penentuan nilai sudut fasenya, kurva dispersi kecepatan fase selanjutnya dapat dihasilkan.

Pada bagian selanjutnya, simulasi model 2 D dan 3 D dilakukan kepada kurva dispersi hasil penelitian Widodo dan Rosyidi (2007) sebagai validasi dan pengukur pembanding terhadap kejituan kedua model.

Untuk mengvalidasi perilaku gelombang permukaan, dilakukan simulasi dalam FEM menggunakan software ABAQUS. Model FEM yang digunakan memiliki karakteristik asimetrik dan parameter sebagai berikut:

- 4-Node Axisymmetric Element

- Element Size : 0.25cm x 0.25cm
- Time interval = 5e-4 sec, Total time = 0.512 sec
- Infinite Elements Used at Boundaries.
- Soil : Vs = 300 m/sec, Poisson's Ratio = 0.333

Layout model perkerasan jalan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2 dan Gambar 3 terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan perkerasan jalan yang merupakan variasi dari jenis perkerasan AC dan ATB, lapisan fondasi dan lapisan tanah dasar yang dipadatkan yang diletakkan di atas tanah asli. Model berdimensi 12 meter panjang yang terdiri dari 4 segmen. Setiap segmennya memiliki panjang 3 meter yang merupakan model perkerasan dengan variasi jenis yang berbeda. Lebar model perkerasan adalah 3 meter panjang. Gambar 3 menunjukkan model perkerasan jalan yang disiapkan. Pada persiapan model perkerasan ini, tanah asli digali sedalam 50 cm, selanjutnya tanah asli dipadatkan. Pemeriksaan bahan dilakukan terhadap tanah asli untuk mengetahui jenis tanah, karakteristik fisik, gradasi dan daya dukung tanah yang direpresentasikan melalui parameter ukur *California Bearing Ration (CBR)*.

Bahan perkerasan agregat yang digunakan dalam penyusunan model perkerasan juga dilakukan pemeriksaan fisik material dan uji mekanik. Bahan agregat dan pasir digunakan untuk menyusun lapisan fondasi dan campuran aspal pada lapisan permukaan. Pemeriksaan fisik juga dijalankan pada bahan aspal yang digunakan. Aspal diperoleh dari hasil produksi penyulingan minyak bumi oleh Pertamina dengan jenis aspal Pen.60/70.

Salah satu rekaman data gelombang seismik dari hasil pengukuran pada model yang diterima oleh sensor pertama dan kedua dengan jarak antara sensor 3 cm di atas model perkerasan AC diberikan dalam Gambar 4 dan Gambar 5. Gelombang dihasilkan dari energi mekanik dari impact jatuh bebas bola baja berdiameter kecil untuk memberikan energi perambatan gelombang seismik berfrekuensi tinggi. Dari kedua rekaman sensor gelombang, dapat diamati terdapat tiga jenis gelombang utama yang terdeteksi oleh sensor, yaitu gelombang tubuh P terekam datang pertama kali dengan nilai amplitudo percepatan yang rendah, selanjutnya disusul penerimaan dari gelombang tubuh S dan gelombang permukaan R.

Analisis selanjutnya yang perlu dilakukan untuk menghasilkan parameter ukur seismik dan parameter teknik untuk kualitas material perkerasan jalan adalah analisis *Cooley-Tukey* atau analisis FFT. Dalam analisis tersebut, data gelombang seismik berdomain waktu dialihkan/ditransformasikan ke dalam domain frekuensi. Tujuan utama analisis ini adalah mendapatkan parameter seismik yang lebih jelas berdomain frekuensi untuk dianalisis guna mendapatkan sifat bahan jalan. Penggunaan analisis frekuensi ini akan meminimalisasi penggunaan algoritma yang kompleks dalam analisis data seismik berdomain waktu (Rosyidi 2004).

Untuk mendapatkan karakteristik seismik kekakuan bahan, data spektrum auto perlu terlebih dahulu dianalisis ke dalam spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*) dan fungsi transfer (*transfer function spectrum*). Pengoperasian spektrum tersebut adalah untuk mengidentifikasi kesamaan dan keterkaitan (*similarity*) di antara dua sinyal yang diterima. Fungsi ini juga dikenali sebagai fungsi gerak balas/reaksi frekuensi dalam bentuk perubahan waktu (*time-shift*). Dari data ini diperoleh informasi identitas waktu tertentu yang dideteksi oleh sensor pertama dan selanjutnya sebagai identitas di sensor kedua. Selisih identitas waktu tersebut akan sama dengan selisih waktu untuk mencari kecepatan perambatan gelombang yang merambat di antara kedua sensor.

Untuk menganalisis perilaku perambatan gelombang seismik khususnya plotting kepada frekuensi mana yang diperlukan dalam analisis kurva dispersi fase dan rekonstruksi spektrum fase yang lebih baik. Penyaringan respon impuls (IRF) diaplikasikan pada data spektrum fase. Gambar 6 menunjukkan analisis IRF dilakukan pada spektrum fase hasil pengukuran pada jarak 3 cm pada model perkerasan. Hasil rekonstruksi spektrum fase ditunjukkan dalam grafik berwarna hijau (garis tipis) dari hasil IRF terhadap spektrum aslinya berwarna biru (garis tebal).

Melalui data beda fase pada setiap frekuensi gelombang dalam spektrum fase dan konfigurasi pengukuran dalam parameter jarak antar sensor diperoleh nilai kecepatan gelombang fase. Contoh analisis kecepatan gelombang fase diberikan dalam Gambar 7 untuk rekonstruksi spektrum fase hasil pengukuran 3 cm (Gambar 6).

Kurva dispersi dari proses pengukuran eksperimen selanjutnya dianalisis melalui proses inverse menggunakan pendekatan matrik kekakuan dinamik bahan 3 D untuk mendapatkan profil perkerasan model perkerasan jalan. Sebagaimana dijelaskan di bagian

simulasi model 2 D dan 3 D, bahwa untuk profil perkerasan jalan, penggunaan model matrik kekakuan 3 D lebih baik dan tepat.

Suatu asumsi profil model perkerasan perlu disusun terlebih dahulu. Dalam analisis, suatu profil awal disusun dalam 8 lapisan. Lapisan pertama dan kedua mewakili lapisan permukaan jalan, sedangkan lapisan ketiga hingga keenam merupakan lapisan fondasi jalan yang diletakkan di atas lapisan tanah dasar yang direpresentasikan dalam lapisan ketujuh dan lapisan tak terhingga (*half-space*). Selain informasi lapisan, parameter bahan seperti kecepatan gelombang geser (dalam unit m/s), rasio Poisson, berat volume bahan (dalam unit kg/m^3) dan rasio pelemahan perlu diasumsi. Untuk menjaga proses simulasi berjalan dengan cepat, asumsi nilai parameter tersebut sebaiknya mendekati nilai yang sebenarnya atau jika memungkinkan berdasarkan informasi pengujian laboratorium. Dalam penelitian ini, nilai asumsi parameter tersebut diperoleh dari beberapa hasil pengujian laboratorium (berat volume bahan) dan hasil kajian oleh Rosyidi (2004) yang menetapkan beberapa nilai asumsi pemodelan dinamik untuk bahan perkerasan jalan. Selanjutnya model kedepan (*forward modeling*) berbasis matrik kekakuan 3 D dijalankan guna mendapatkan profil SMP dengan mengvariasikan nilai rasio kedalaman dan panjang gelombang ($H-\lambda$). Rasio yang digunakan adalah 0.51 hingga 0.59. Rasio $H-\lambda$ yang dicari adalah yang memiliki nilai kesalahan RMS terendah terhadap kurva dispersi eksperimen. Gambar 8 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 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 10). Berdasarkan profil model SMP ke 3, proses inversi lanjutan dilaksanakan.

Selain kemampuannya untuk menganalisis modulus elastisitas, teknik SASW memiliki potensi untuk melakukan analisis parameter dinamik bahan diantaranya koefisien pengurangan tak dipengaruhi frekuensi (*frequency independent attenuation coefficient, α_0*) untuk struktur perkerasan berasaskan spektrum kuasa auto dan fungsi koheren, serta penentuan nilai rasio pelemahan (*damping ratio*).

Suatu sistem eksperimental terpadu telah diusulkan dalam invensi ini. Tiga sensor digunakan untuk mendapatkan data perambatan gelombang. Sensor pertama difungsikan

sebagai analisis *impact-echo* yang melibatkan perhitungan kecepatan gelombang P untuk mendapatkan nilai ketebalan lapisan permukaan secara cepat dan sebagai masukan bagi proses inversi khususnya untuk keakuratan penilaian ketebalan lapisan permukaan perkerasan. Sensor kedua dan ketiga digunakan untuk mendapatkan kecepatan gelombang P dan S yang mewakili nilai kekakuan bahan lapisan permukaan.

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

1. Garis tengah imajiner dalam susunan sensor diukur dan ditentukan. Seterusnya dua sensor dengan spesifikasi yang sama, diletakkan dalam satu garis lurus di atas permukaan lapisan yang telah diukur mengikut konfigurasi titik tengah sensor (Gambar 11). Sensor ketiga diletakkan dekat dengan sumber gelombang yang jaraknya adalah kurang dari setengah tebal perkerasan ukur prediksi. Ketiga sensor juga harus terlekat secara baik di permukaan jalan agar dapat mendeteksi pergerakan gelombang dengan jelas dan tidak terdapat gangguan pada perpindahan fase akibat reaksi yang berbeda dari sensor. Penganalisis spektrum selanjutnya diatur untuk menunjukkan operasi spektrum tenaga, fungsi transfer atau spektrum tenaga silang dan fungsi koheren.
2. Gelombang seismik dihasilkan dari sumber gelombang yang dijatuhkan atau dipukulkan dengan energi terbatas ke atas permukaan jalan guna menyalurkan energi seismik tersebut menuju ke ketiga sensor. Penghasilan dan perekaman gelombang dilakukan secara berulang kali untuk memperoleh sinyal rata-rata dalam domain frekuensi.
3. Spektrum selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan tebal perkerasan untuk proses inverse.

Klaim

1. Suatu model teknologi seismik berupa teknik Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW) atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang mencakup : model numeris dan analitis.

2. Model teknologi seismik berupa teknik Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW) atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang sesuai dengan klaim 1, dimana kerangka pemodelan berupa model pemrosesan sinyal

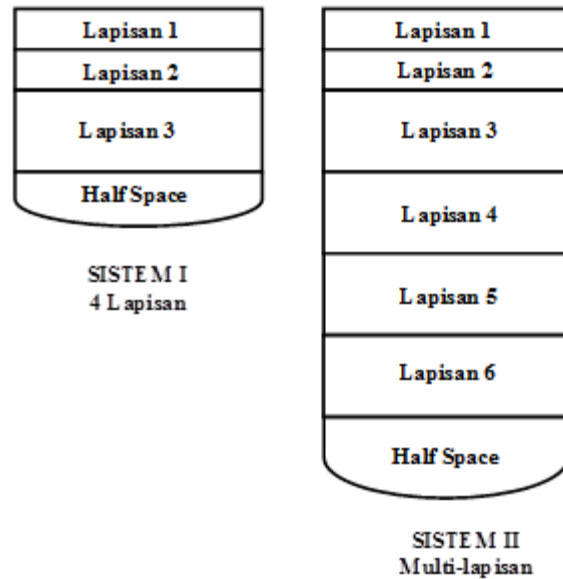
linier, model pembangunan kurva dispersi, model analitis inversi 2-D, 3-D, dan FEM serta model fitting optimalisasi kurva dispersi teoritik dan eksperimen.

3. Model teknologi seismik berupa teknik Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW) atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang sesuai dengan klaim 2, dimana kerangka kedua adalah tahapan validasi dan kalibrasi model rencana dari kerangka pertama, yang diuji dalam model simulasi numeris dan analitis dan model fisik perkerasan jalan Indonesia.

Abstrak

METODE INTEGRATED-SPECTRAL-ANALYSIS-OF-SURFACE-WAVE (SASW) UNTUK EVALUASI NILAI MODULUS ELASTISITAS STRUKTUR PERKERASAN JALAN DI INDONESIA

Invensi ini berhubungan dengan suatu model teknologi seismik berupa teknik Integrated-Spectrum-Analysis-of-Surface-Waves (Integrated-SASW) atau analisis spektrum gelombang permukaan terpadu yang mencakup model numeris dan analitis. Kerangka pemodelan yang sesuai dengan invensi ini lebih lanjut berupa model pemrosesan sinyal linier, model pembangunan kurva dispersi, model analitis inversi 2-D, 3-D, dan FEM serta model fitting optimalisasi kurva dispersi teoritik dan eksperimen. Selanjutnya kerangka kedua adalah tahapan validasi dan kalibrasi model rencana dari kerangka pertama, diuji dalam model simulasi numeris dan analitis dan model fisik perkerasan jalan Indonesia.



Gambar 1

Tabel 1

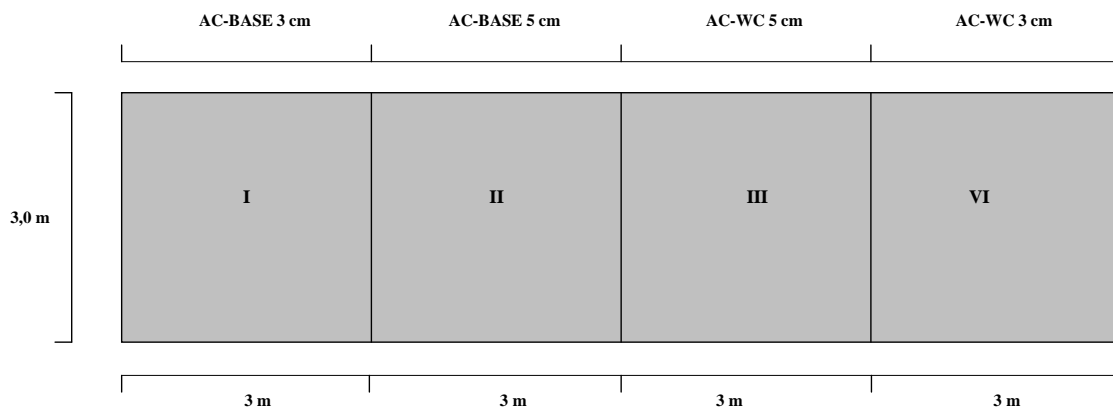
No Lapisan	Ketebalan m	V _p m/s	V _s m/s	ρ kg/m ³	μ	D
1	0,1	3095,45	1787,16	2400	0,25	0,02
2	0,1	3730,61	2153,87	2400	0,25	0,02
3	0,2	2202,99	1271,9	2400	0,25	0,02
Half Space	40	640,009	369,509	2400	0,25	0,02

Tabel 2

No Lapisan	Ketebalan m	V _p m/s	V _s m/s	ρ kg/m ³	μ	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

Tabel 3

No Lapisan	Ketebalan m	V_p m/s	V_s m/s	ρ 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



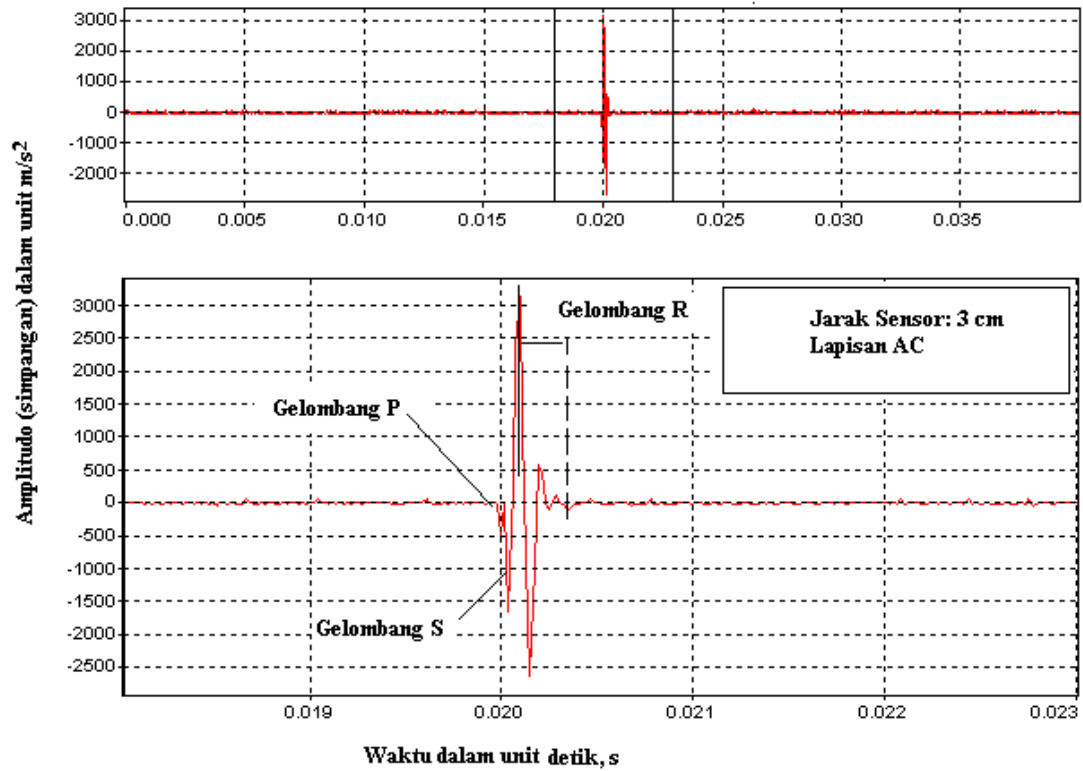
Gambar 2



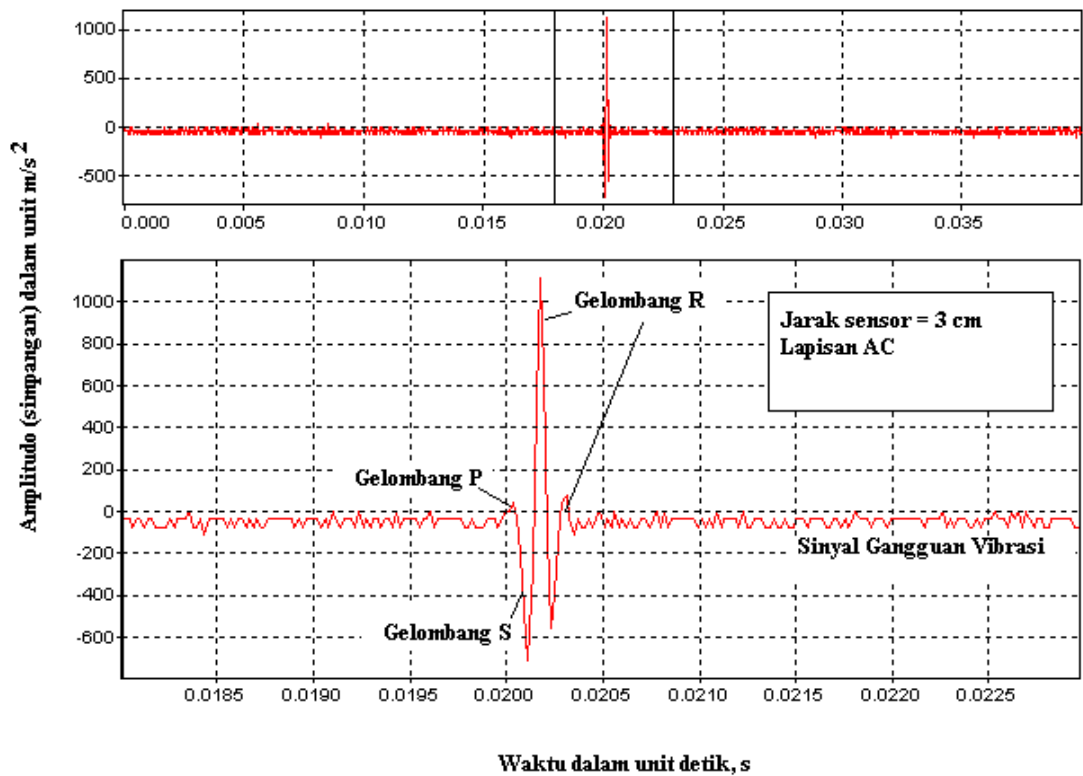
(a)

(b)

Gambar 3



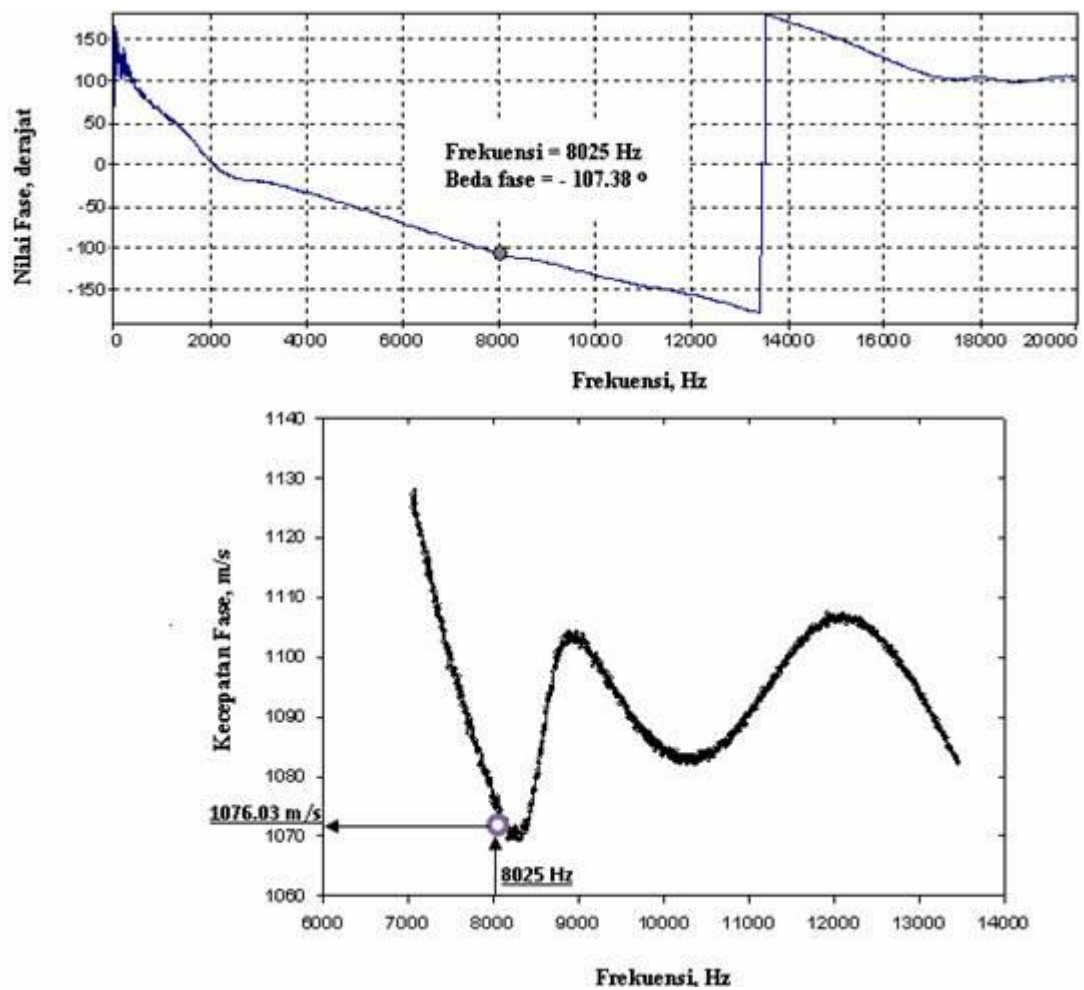
Gambar 4



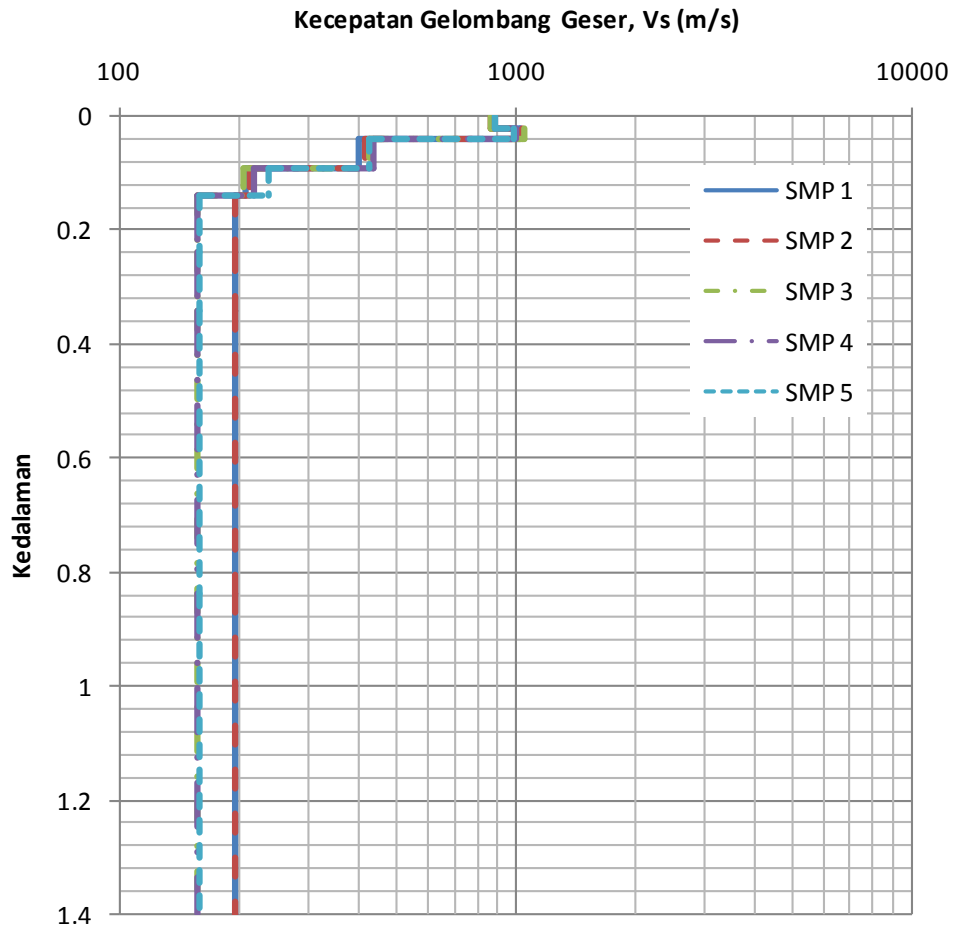
Gambar 5



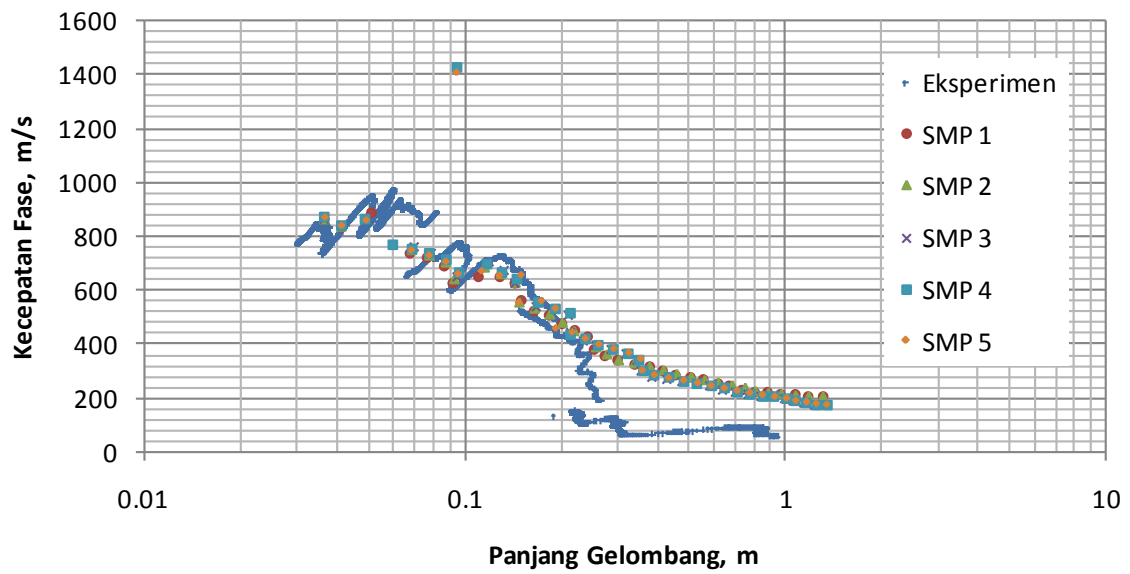
Gambar 6



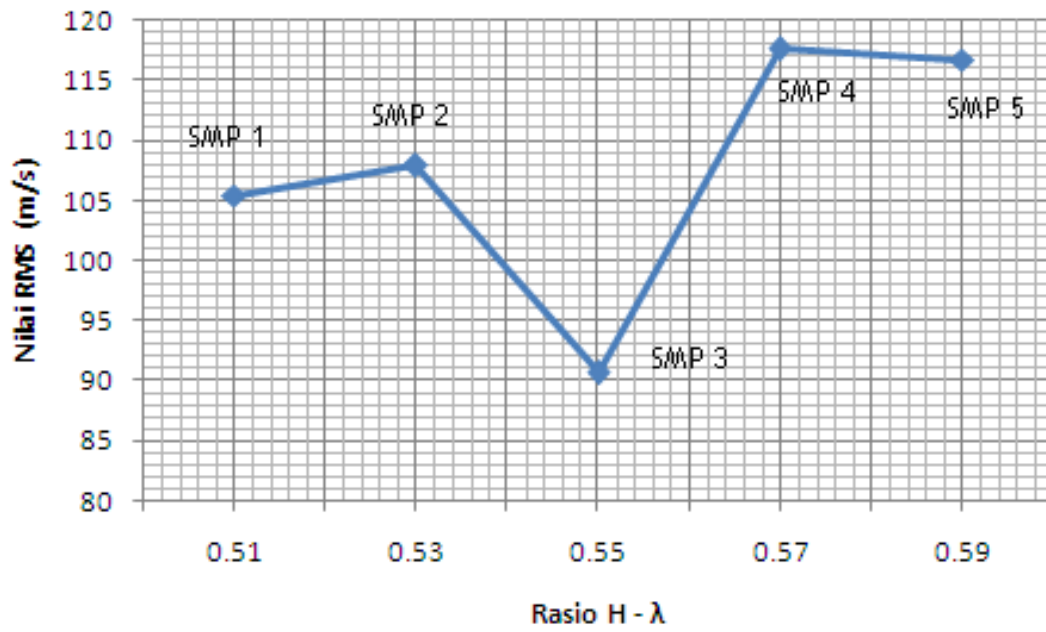
Gambar 7



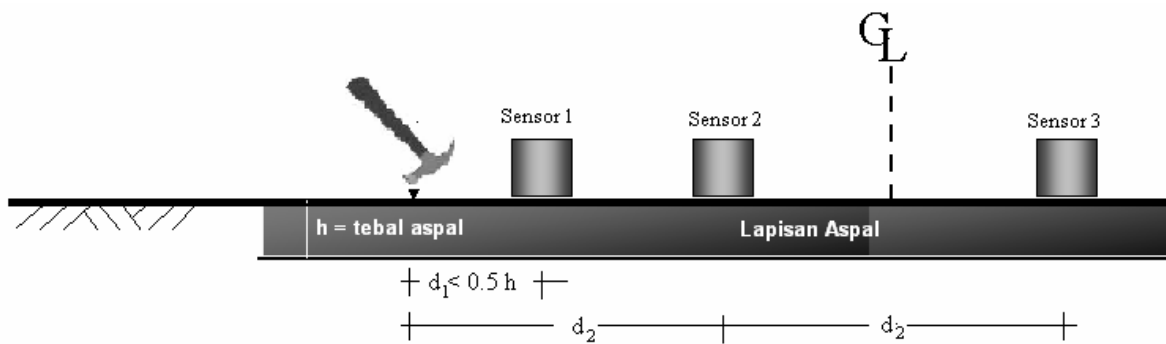
Gambar 8



Gambar 9



Gambar 10



Gambar 11 Konfigurasi sistem eksperimen SASW terpadu

KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA REPUBLIK INDONESIA
DIREKTORAT JENDERAL HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL

Nomor Permohonan, Waktu, Merek, Jumlah Uang, Petugas Loker*

Tanggal Penerimaan *

FORMULIR PERMOHONAN MEREK

Dengan ini kami/saya mengajukan permohonan merek Dagang Jasa dengan data sebagai berikut :

1. Data Pemohon <input type="checkbox"/> Perorangan <input type="checkbox"/> Badan Hukum <input type="checkbox"/> Kolektif			
Nama			
Warga Negara			
Alamat			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	
Alamat Korespondensi			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	
2. Melalui Konsultan <input type="checkbox"/> Ya <input type="checkbox"/> Tidak			
Nomor dan Nama Konsultan HKI			
Nama Kantor Konsultan HKI			
Alamat Kantor Konsultan HKI			
Telepon/Fax		Email	
3. Data Prioritas <input type="checkbox"/> Dengan Hak Prioritas <input type="checkbox"/> Tidak Dengan Hak Prioritas			
Nomor Prioritas	Tanggal Prioritas	Negara	

4. Uraian Merek

Merek		Etiket
Uraian Warna Etiket		
Arti Bahasa/Huruf/ Angka Asing Dalam Etiket		
Kelas Barang/Jasa		
Jenis Barang/Jasa		

5. Biaya

Jumlah biaya yang dibayarkan	Dasar	Rp	
	Kelebihan jenis barang/jasa	Rp	

Lampiran

- Surat Pernyataan Kepemilikan
- 5 lembar etiket
- Salinan Akta Perusahaan
- Surat Kuasa Bermaterai
- Bukti Prioritas Asli
- Terjemahan Bukti Prioritas
- Salinan Peraturan Penggunaan Merek Kolektif
- Foto copy KTP
- Bukti Pembayaran

Tanggal

Pemohon/Konsultan

Nama Jelas

Cap dan tanda tangan Petugas

Lampiran Data Pemohon (Tambahan)

Nama			
Warga Negara			
Alamat			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	

Nama			
Warga Negara			
Alamat			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	

Nama			
Warga Negara			
Alamat			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	

Nama			
Warga Negara			
Alamat			
Kota		Propinsi	
Kode Pos		Negara	
Telepon		Email	

Lampiran Kelas dan Jenis Barang/Jasa (Tambahan)

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Kelas Barang/Jasa

Jenis Barang/Jasa

Sustainable Civil Infrastructures

Wavelet-Spectrogram Analysis of Surface Wave Technique for Quick NDT Measurement on Surface Layer of Pavement --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	SUCI-D-16-00543R1	
Full Title:	Wavelet-Spectrogram Analysis of Surface Wave Technique for Quick NDT Measurement on Surface Layer of Pavement	
Article Type:	Full Paper	
Section/Category:	GeoMEast	
Funding Information:	Ministry of Research, Technology and Higher Education (DIPA-042.06-0.1.401516/2016)	Mr. Sri Atmaja P Rosyidi
Abstract:	<p>Reliable assessment of in situ pavements stiffness is an important aspect in effectively managing a pavement system. The aim of this paper is to propose the new procedure, namely the wavelet-spectrogram of surface wave (WSSW) technique for non-destructively measurement of elastic modulus on surface layer of a pavement system. Using two receivers, surface wave waveform on pavement surface was recorded and transformed into in frequency domain by wavelet analysis. For this analysis, a derivative Gaussian wavelet was selected as an appropriate mother wavelet for seismic waveform propagating along pavement surface. Thus, an interactive 2-D plot of time-frequency spectrogram consisting of wave-energy spectrum was simultaneously generated. CWT-filtration method was implemented in order to reduce the effect of noisy signal recorded during measurement. From selected wave spectrogram, the unwrapped phase different spectrum was generated to obtain phase velocity which was performed by least-square linear regression. Finally, the elastic modulus of pavement surface layer was calculated from a modified relationship between phase velocity, Poisson ratio and density of pavement surface layer. The results show that the proposed technique is able to measure in situ elastic stiffness of the surface layer. In addition, the change of the surface layer stiffness is also able to be monitored. The stiffness produced by the WSSW technique is classified as a modulus at very low strain level.</p>	
Corresponding Author:	Sri Atmaja P Rosyidi, B.Sc., M.Sc., Ph.D., P.Eng. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta Bantul, DI. Yogyakarta INDONESIA	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Sri Atmaja P Rosyidi, B.Sc., M.Sc., Ph.D., P.Eng.	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Sri Atmaja P Rosyidi, B.Sc., M.Sc., Ph.D., P.Eng.	
Order of Authors Secondary Information:		
Author Comments:		
Suggested Reviewers:	<p>Nur Izzi Md Yusoff, B.Sc.Hons, M.Eng., Ph.D. Senior Lecturer, Universiti Kebangsaan Malaysia Faculty of Engineering and Built Environment izzi.alkutani@gmail.com</p> <p>Dr. Nur Izzi Md. Yusoff is an expert in pavement engineering and testing. He has numerous research in pavement and have been published in reputable international journals. He is also having a research subject in NDT for pavement and insitu pavement investigation.</p>	

[Click here to view linked References](#)

Wavelet-Spectrogram Analysis of Surface Wave Technique for Quick NDT Measurement on Surface Layer of Pavement

Sri Atmaja P. Rosyidi, PhD

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Indonesia, atmaja_sri@umy.ac.id.

ABSTRACT: Reliable assessment of in situ pavements stiffness is an important aspect in effectively managing a pavement system. The aim of this paper is to propose the new procedure, namely the wavelet-spectrogram of surface wave (WSSW) technique for non-destructively measurement of elastic modulus on surface layer of a pavement system. Using two receivers, surface wave waveform on pavement surface was recorded and transformed into in frequency domain by wavelet analysis. For this analysis, a derivative Gaussian wavelet was selected as an appropriate mother wavelet for seismic waveform propagating along pavement surface. Thus, an interactive 2-D plot of time-frequency spectrogram consisting of wave-energy spectrum was simultaneously generated. CWT-filtration method was implemented in order to reduce the effect of noisy signal recorded during measurement. From selected wave spectrogram, the unwrapped phase different spectrum was generated to obtain phase velocity which was performed by least-square linear regression. Finally, the elastic modulus of pavement surface layer was calculated from a modified relationship between phase velocity, Poisson ratio and density of pavement surface layer. The results show that the proposed technique is able to measure in situ elastic stiffness of the surface layer. In addition, the change of the surface layer stiffness is also able to be monitored. The stiffness produced by the WSSW technique is classified as a modulus at very low strain level.

INTRODUCTION

The spectral-analysis-of-surface-wave (SASW) is a well-known of non-destructive techniques (NDT) in pavement evaluation and geotechnical investigation. The SASW employs the surface waves dispersion in order to determine the shear wave velocity corresponding to stiffness of each layer at pavement and soil profile. The method performs three steps of an elaborated data process, i.e., (1) collecting seismic data, (2) constructing an experimental dispersion curve and (3) conducting an inversion process of the dispersion curve for generating a stiffness profile. The method has been improved and utilized in many civil engineering applications, e.g., site characterization (Stokoe *et al.* 1994), soil density (Kim *et al.* 2001), pavement characterization (Rosyidi *et al.* 2007, Yusoff *et al.* 2013), soil damping measurement in soft soil sites (Rosyidi & Taha, 2012), and asphaltic pavement measurement (Hazra & Kumar, 2014, Rosyidi, 2015).

In inversion process, the advanced mathematical approach is required to produce the stiffness profile from a dispersion curve. Reliable inversion procedure using stress-wave propagation theories, i.e., the transfer matrix method, the dynamic stiffness matrix method and the finite difference method should be employed. All the methods

1
2
3
4 require an initial profile model consists of a set of homogeneous layers extending to
5 infinity in the horizontal direction. In each layer of profile, the information such as a
6 thickness, a shear wave velocity, a Poisson's ratio (or compression wave velocity), and
7 a mass density are assigned. Based on the initial profile, a theoretical dispersion curve
8 is calculated using one of these wave propagation theories. The theoretical dispersion
9 curve is then compared with the experimental dispersion curve. If the two dispersion
10 curves do not match, the initial profile (number of layers, layer thickness, shear wave
11 velocity, or any combination) is adjusted, and another theoretical dispersion curve is
12 calculated. The trial-and-error procedure is repeated until the two curves match, and
13 then the associated assumed profile is considered the real profile. In addition, when the
14 SASW method is performed on irregular stiffness profile, i.e. pavement structure, the
15 trial-and-error procedure becomes a difficult analysis and takes longer time in data
16 processing. However, due to complexity in surface wave analysis, application of these
17 methods on pavement evaluation is still relatively limited. On the other hand, in
18 pavement evaluation system, the need of accurate, cost-effective and non-destructive
19 evaluation is becoming ever important because the rehabilitation and management of
20 roads is becoming increasingly difficult due to the increasing number of aging roads
21 and limited budgets. As well, for practical purpose, pavement engineer usually needs a
22 quick and relatively effortless analysis for determining the structural condition of
23 pavement surface layers.
24
25
26
27
28
29

30 In this paper, a new procedure in a surface wave technique which is using continuous
31 wavelet transform combined with the elastic stiffness formulation for obtaining the
32 phase velocity is introduced. This method is namely the wavelet-spectrogram of
33 surface wave (WSSW) technique. The time-frequency decomposition of continuous
34 wavelet transform (CWT) on seismic signals is employed to characterize the phase
35 information of phase different spectrum. It provides a reliable information of wave
36 spectrum in the pavement profile. An algorithm on phase different calculation in this
37 analysis aims to avoid the use of a complex inversion algorithm to obtain the elastic
38 modulus of the pavement surface layer. In the SASW method, data analysis and
39 processing in frequency domain has been carried out by fast Fourier transforms (FFT).
40 However, due to Fourier transform works by expressing any arbitrary periodic
41 function of time with period as sum a set of sinusoidal, this analysis becomes
42 inconsistent and is unable to preserve the time dependence and describe the
43 evolutionary spectral characteristics of non-stationary processes (Rosyidi *et.al.*, 2009).
44 Wavelet analysis is becoming an effective tool for analyzing localized variations of
45 power within a time series. By decomposing a time series into time-frequency
46 spectrum (TFW), one is able to determine both the dominant modes of variability and
47 how those modes vary in time. A typical result from a case study is presented herein
48 for the structural assessment of an existing asphalt concrete (AC) pavement in West
49 Java, Indonesia.
50
51
52
53
54
55

56 **Continuous Wavelet Transform**

57 The continuous wavelet transform (CWT) has been used in many studies in
58 geophysics (Foufoula-Georgiou & Kumar 1995) and civil engineering application
59 (Rosyidi *et. al.* 2009). The continuous wavelet transform (CWT) technique is an
60
61
62
63
64
65

alternative tool for localizing the interested frequency of seismic signal processing particularly in non-stationary problems. Wavelets dilate in such a way that the time support changes for different frequency. When the time support increases or decreases, the frequency support of the wavelet is shifted toward high or low frequencies, respectively. Therefore, as the frequency resolution increases, the time resolution decreases and vice versa. The characteristic of time-frequency resolution creates the CWT technique useful for non-stationary seismic analysis.

A wavelet is defined as a function of $\psi(t) \in L^2(\mathfrak{R})$ with a zero mean, which is localized in both time and frequency. By dilating and translating the wavelet $\psi(t)$, it can be used to produce a family of wavelets as:

$$\psi_{\sigma,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) \quad (1)$$

where σ is the dilation parameter or scale and τ is the translation parameter ($\sigma, \tau \in \mathfrak{R}$ and $\sigma \neq 0$). The wavelet has also various wavelet shape used for signal analysis which is called the mother of wavelet, i.e., Gaussian, Morlet, Paul and Mexican Hat. An appropriate selection of wavelet shape signal analysis depends on the seismic waveforms.

The CWT is defined as the inner product of the family wavelets $\Psi_{\sigma,\tau}(t)$ with the signal of $f(t)$ which is given as:

$$F_W(\sigma, \tau) = \langle f(t), \psi_{\sigma,\tau}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \bar{\psi}\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) dt \quad (2)$$

where $\bar{\psi}$ is the complex conjugate of ψ , $F_W(\sigma, \tau)$ is the time-scale map.

In this study, the mother wavelet of the Gaussian Derivative (GoD) was used. The real component of the GoD wavelet in the time and frequency domains is defined as follows:

$$\psi_0(t) = \frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}} \frac{d^m}{d\eta^m} \left(e^{-t^2/2} \right) \quad (3)$$

$$\hat{\psi}_0(s\omega) = -\frac{i^m}{\sqrt{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}} (s\omega)^m \left(e^{-(s\omega)^2/2} \right) \quad (4)$$

where m is the wave number and Γ is the Gamma function. The complex wavelet is generated by the addition of a Heaviside function in the frequency domain. This wavelet decays with the square root of the gamma function. The GoD has wavelet's derivative order that can be varied in order to get the best resolution of the waveform.

RESEARCH METHOD

Field Measurement

In field measurement of the WSSW method, a set of ball bearing with weight from 5

to 15 g was used as an impact source to generate seismic waves on the surface layer of pavement. Generated seismic waves were then detected using two high frequency accelerometers. Consequently, the signals were recorded using an ADT analog-digital acquisition connected to a notebook computer for post processing (Fig. 1). In this study, two configurations of mid-point receiver spacing and the receiver-source spacings were employed in order to sample different depths of pavement surface. The configuration of mid-point receiver spacings was described in Fig. 2. The receiver spacing (d_2) was obtained as a distance which the length is less than and/or equal to the thickness (H) of pavement surface layer. Whereas, the distance between a source and first receiver (d_1) was set as equal to receivers spacing (d_2). Due to the interested pavement area in measurement was asphaltic surface layer, the short receiver spacings of 5, 10 and 15 cm with a high frequency source were only used. In the test, repetition procedure (forward and backward) until at least 4 to 6 times in each receiver spacing measurement should be employed in order to minimize the effect of internal phase shift between receivers and to enhance a good average of received signals.

Beside the WSSW test, the SASW measurement was also carried out at same sites. The pit test was also conducted to acquire the information of a pavement profile. From the pit test, the pavement structure consists of an asphalt concrete (AC) layer (18 cm), crushed stone of base course (10 cm), sub-base course (30 cm) over a subgrade layer.

Data Analysis and Process

A proposed procedure of the WSSW method consists of seismic data analysis using continuous wavelet transform and elastic modulus calculation of elastic linear model on pavement surface layer which is described as follows:

1. The seismic wave data are collected from field measurement using a configuration of the mid-point receiver spacings.
2. The time-frequency spectrum analysis based on continuous wavelet transform of Gaussian Derivative (DoG) mother wavelet is carried out for two signal waveforms recorded from field measurement. By decomposing a time series of seismic waveform into time-frequency (TF) spectrogram, the dominant modes of variability and how those modes vary in time can be determined very well.
3. Phase information of the transfer function (phase spectrum) are then determined from both TF spectrograms. The data informs the time difference of wave propagating from first to second receiver. A mathematical expression for calculating phase spectrum from TF spectrogram is defined by (Rosyidi & Taha, 2012):

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \approx \frac{W_{f(u,s)}^Y}{W_{f(u,s)}^X} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Y(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} X(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi^* \left(\frac{t-\tau}{\sigma} \right) dt} \quad (5)$$

where,

$X(f)$ = spectrum input of signal, $X(t)$, from first receiver,

1
2
3
4 $Y(f)$ = spectrum output of signal, $Y(t)$, from second receiver,
5

$$6 \quad W_{f(u,s)}^Y = \int_{-\infty}^{\infty} Y(t) \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{-i\xi(t-u)} \quad (6)$$

$$7 \quad W_{f(u,s)}^X = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{-i\xi(t-u)} \quad (7)$$

8
9
10 From Eq.7, the phase spectrogram in time-frequency domain can be obtained by:
11

$$12 \quad H(u,s) = \frac{W_f^{XY}(u,s)}{W_f^{XX}(u,s)} = \frac{|W_f^{XY}(u,s)| e^{i(\theta_Y(a,b) - \theta_X(a,b))}}{W_f^X(u,s)^* \times W_f^X(u,s)} \quad (8)$$

13
14 Thus, phase different is obtained from the ratio of the imaginary to real part of
15 the phase spectrogram which is expressed as:
16

$$17 \quad \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Im H(u,s)}{\Re H(u,s)} \right) \quad (9)$$

- 18
19
20
21
22
23
24
25
26 4. The coherence function is used to visually inspect the quality of signals being
27 recorded in the field and have a real value between zero and one in the range of
28 frequencies being measured. The value of one indicates a high signal-to-noise
29 ratio (i.e. perfect correlation between the two signals) while values of zero
30 represents no correlation between the two signals. The coherence function is a
31 ratio of the output power caused by the measured input to the total measured
32 output which is defined as:
33

$$34 \quad \gamma^2(f) = \frac{G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)} \quad (10)$$

- 35
36
37
38 5. A linear relationship between the phase different and frequency from the transfer
39 function spectrum is then derived. The phase velocity is examined as a function of
40 distance from the slope value (m). This relationship can be written as:
41

$$42 \quad \phi = \left| \frac{360D}{V_{ph}} \right| f = mf \quad (11)$$

43
44
45 By Equation 11, one can easily determine V_{ph} by performing a least-square linear
46 regression over the frequency range in the transfer function spectrum and the
47 slope of the best-fit line (m) can be obtained. The phase velocity of surface wave
48 propagation is independent of the wavelength for up to a wavelength
49 approximately equal to thickness of the uppermost layer. The range of
50 wavelength to be used can be estimated from the phase velocities (V_{ph}) of the
51 material anticipated at the site:
52

$$53 \quad \lambda = \frac{V_{ph}}{f} \quad (12)$$

54
55 where f is the frequency.
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

- 1
2
3
4 6. If one simply generates high frequency waves and assumes that properties of the
5 uppermost layer are uniform, the dynamic elastic moduli of the pavement
6 materials can easily be determined as follows:
7

$$8 \quad E = 2 \frac{\gamma}{g} V_s^2 (1 + \mu) = \frac{\gamma}{g} |K V_{ph}|^2 \quad (13)$$

$$9 \quad K = (1.13 - 0.16\mu) \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \quad (14)$$

10
11 where E is the dynamic elastic modulus, respectively, V_s is the shear wave
12 velocity, V_{ph} is the phase wave velocity, g is the gravitational acceleration, γ is the
13 total unit weight of the material and μ is the Poisson's ratio.
14
15
16
17
18

19 RESULTS AND DISCUSSION

20 Stiffness and Elastic Modulus

21 The WSSW measurements were carried out at 12 sites on existing asphalt pavements.
22 A typical result of received signals from field measurement was shown in Figure 3.
23 The body waves (Primary and Secondary wave) and surface wave (Rayleigh wave) are
24 clearly shown in both signal recordings. Therefore, the Gaussian Derivative (GoD)
25 continuous wavelet transform (CWT) was employed on signals for generating a time-
26 frequency (TF) plot. Both CWT plots may overcome on identification problem of the
27 spectral characteristics of non-stationary signals measured in two receivers. The
28 typical CWT spectrogram for received signals with an improved time-frequency
29 resolution is shown in Fig. 4. From Fig.4, two main energy events at different
30 frequency bands were also clearly detected which may result in both low and higher
31 mode of seismic waves. It is able to observed that lower frequency energy was found
32 in the range of 2.8 - 16 kHz in CWT spectrogram. This spectrum range is identified as
33 surface wave signals. The level and frequency range of these signals were determined
34 by independent-measurement of high level energy in surface wave propagation (up to
35 60 % of total wave energy). Thus, the other energy event is identified as wave mode
36 from direct and reflected body waves which was found in more than 20 kHz. The
37 dominant wave energy found in CWT spectrogram at interested frequency range of
38 surface waves can be clearly captured. The TF of GoD-CWT provides good
39 resolutions at high frequencies of signals. It is also effective in the detection of
40 frequency bandwidth of wave groups using various derivation order of this mother
41 wavelet (GoD).
42
43
44
45
46
47
48
49

50 Based on both TF spectrograms (Fig. 4), the phase different between two signals for
51 every wave frequency were then calculated. As a result, a transfer function spectrum
52 on wrapped phase different curve was obtained as given in Fig. 5. The phase data
53 oscillates between $-\pi$ and π radian (-180 and 180 degrees). This is the standard
54 illustration of spectrum presenting phase data because the detail variation in data can
55 be observed in a small space.
56
57

58 Fig. 5 also shows that the phase different curve reveals a smooth trend of variation in
59 phase with frequency up to a frequency of 25 kHz. It indicates the high-frequency
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 surface waves were detected representing the high stiffness of the asphalt concrete
5 surface layer on a pavement structure. The quality of phase data is also controlled by
6 the coherence function. As shown in Fig. 6, the phase data up to frequency of 20 kHz
7 have the value of coherence magnitude above 0.98.
8
9

10 In order to obtain the modulus value of the surface layer, the smoothed fitting process
11 of weighing function was used. The fitted curve between the raw and the smoothed
12 phase spectrum is shown in Fig. 5. Thus, the phase data is unwrapped by adding the
13 number cycles to each phase. The unwrapped of the raw phase spectrum is also
14 shown in Fig. 7. The unwrapped phase spectrum is smoothed by the linear regression
15 as the best fit curve to the raw data. The slope of the line is more or less constant with
16 frequency. A line is fitted to the curve in the range of the frequency corresponding to
17 wavelengths shorter than the thickness of the surface layer. Slope value of the line can
18 be used to determine the elastic modulus of the surface layer of the pavement profile
19 using Equation 11, 13 and 14.
20
21
22
23

24 From Fig. 7, the slope (m) of best-fit curve is found to be 0.0140. Consequently, the
25 phase velocity can be calculated using Eq.13 which is found to be 1028.57 m/s. Based
26 on the phase velocity, field configuration data and material parameters, such as of
27 receiver spacing (d_2) of 5 cm, Poisson's ratio of asphaltic layer of 0.25 and unit weight
28 for pavement material (AC) of 2,200 kg/m³, the elastic modulus of asphaltic (AC)
29 surface layer is obtained as 845,662,040.80 kg/m² or 8456.62 MPa.
30
31

32 The result shows that the elastic modulus of AC layer can be easily determined using
33 the WSSW technique. However, the value of elastic modulus presented is relatively
34 high. It is due to the seismic technique measures the dynamic stiffness at very low
35 strain level (less than 10³ %). In this level, the material modulus behavior can be
36 assumed as a constant and have only a maximum value. To illustrate the usefulness
37 and sensitivity of this approach in testing the surface layer, changes in the stiffness of
38 the existing surface and the overlay layer of the pavement were measured in situ.
39 Figure 8 shows that the different stiffness of an existing and overlay surface layer
40 from the measured profile can be investigated well. Based on these results, it can be
41 summarized that the stiffness changes in the surface layer were easily, non-
42 destructively, and fast measured by the WSSW technique.
43
44
45
46

47 **Validation with the SASW method**

48 In order to validate the results from the WSSW test, the spectral-analysis-of-surface-
49 wave (SASW) analysis was conducted at same locations of a road pavement. In this
50 method, a set of transient impact sources was used to generate surface wave energy
51 that propagates horizontally near the surface layer of the pavement. The phase
52 differences of signal data were obtained from the cross-power spectrum. Thus, the
53 phase information was then unwrapped to produce the dispersion curve of the phase
54 velocity versus wavelength. An inversion process was then iteratively employed to
55 confirm the experimental dispersion curve from the theoretical model established. A
56 3-D stiffness matrix model (Rosyidi, 2007) was employed in the SASW inversion
57 analysis. Final stiffness profile was obtained after 16 times of iteration with the root-
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 mean-square error (RMS) of 35.47 m/s or average deviation of about 5.92 %.
5
6

7 The equivalent shear wave profile from the result of the inversion is shown in Fig. 9
8 and using the dynamic material equation, its equivalent dynamic elastic modulus
9 profile is given in Figure 10. A modulus profile as shown in Fig. 10 is only given to 10
11 cm depth of pavement structure due to the asphaltic layer was indicated at this level. A
12 good agreement of elastic modulus resulted from the WSSW and the SASW method is
13 also presented in Fig. 10. The result shows that the difference between both methods
14 is calculated at 0.01 % and 1.14 % for first and second layer of pavement surface
15 layer, respectively.
16

17 **CONCLUSIONS**

18 The dynamic elastic modulus profile obtained from the proposed technique of the
19 wavelet-spectrogram analysis of surface waves (WSSW) were presented in this paper.
20 This technique improves the conventional SASW measurement testing and was used
21 for investigation in the complex pavement structure. In this paper, the identification,
22 denoising and reconstruction of the wave response spectrum from seismic surface
23 wave propagation using time-frequency analysis of continuous wavelet transforms is
24 presented. The spectrogram could be used to clearly identify the various events of
25 interest mode of the seismic surface waves. By the simple calculation on phase
26 spectrum from the surface wave data, the elastic modulus of the surface layer can be
27 obtained without the complex calculation of the inversion process. The calculation is
28 easy and can be simply implemented. This technique is also a very sensitive non-
29 destructive testing (NDT) to monitor the change of the modulus of the existing surface
30 and overlay layers.
31
32
33
34

35 **ACKNOWLEDGMENTS**

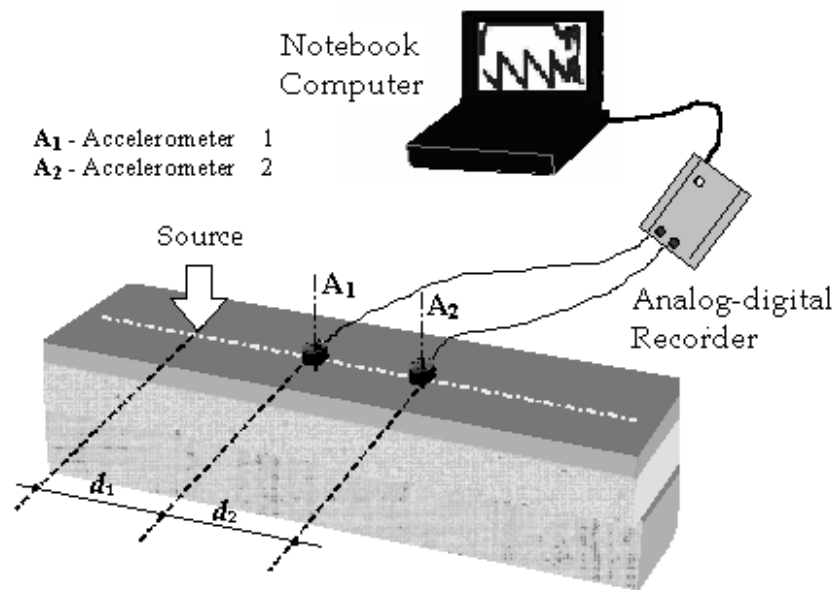
36 This work is part of research project funded by Ministry of Research, Technology and
37 Higher Education, Indonesia and the Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY).
38 Their supports are gratefully acknowledged. We would also like to thank Dr.Siegfried
39 (Puslitbang Jatan, Bandung) and research assistants for their assistance during field
40 works.
41
42
43

44 **REFERENCES**

- 45
46
47 Foufoula-Georgiou, E. and Kumar P. (1995). Wavelets in Geophysics. Academic
48 Press.
49 Hazra Sutapa and Kumar Jyant (2014). SASW testing of asphaltic pavement by
50 dropping steel balls. International Journal of Geotechnical Engineering, Taylor &
51 Francis. doi. 10.1179/1938636213Z.00000000051
52 Kim D.S. *et. al.* (2001). Evaluation of density in layer compaction using SASW
53 method. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Elsevier. doi:10.1016/S0267-
54 7261(00)00076-2
55 Rosyidi S.A.P. *et. al.* (2009). Signal reconstruction of surface waves on SASW
56 measurement using Gaussian derivative wavelet transform. Acta Geophysica,
57 Springer. doi: 10.2478/s11600-009-0015-8
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 Rosyidi S.A.P. (2007). Comparison between 2-D and 3-D stiffness matrix model
5 simulation of SASW inversion for pavement structure. Civil Engineering
6 Dimension, Journal of Civil Engineering Science and Application, Vol. 9, No. 1,
7 pp. 42-48.
8
9 Rosyidi S.A.P. (2015). Simultaneous in-situ stiffness and anomalies measurement on
10 pavement subgrade using tomography surface waves technique. Procedia
11 Engineering, Elsevier. doi:10.1016/j.proeng.2015.11.057
12
13 Rosyidi S.A.P. and Taha M.R. (2012). Wavelet spectrogram analysis of surface wave
14 technique for dynamic soil properties measurement on soft marine clay site.
15 Seismic Waves - Research and Analysis, Intech. doi: 10.5772/27530
16
17 Rosyidi S.A.P. *et. al.* (2007). Development of VS-CBR-DCP empirical model for
18 determining dynamic stiffness of pavement base layer using SASW. Proceedings of
19 International Conference on Advanced Characterisation of Pavement and Soil
20 Engineering Materials, pp.895-902.
21
22 Stokoe II K.H. *et. al.* (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method.
23 Geotechnical characterization of sites. R.D. Wood, Ed., Oxford and IBH Publishing
24 Co., New Delhi, India, pp.15-26.
25
26 Yusoff N.I.M. *et. al.* (2015). Measurements of the elastic modulus of pavement
27 subgrade layers using the SASW and FWD test methods. The baltic journal of road
28 and bridge engineering, Vilnius: Technika. doi: 10.3846/bjrbe.2015.22
29
30
31
32

33 **FIGURES**



55 **FIG. 1. Experimental set up of WSSW measurement on a pavement structure**

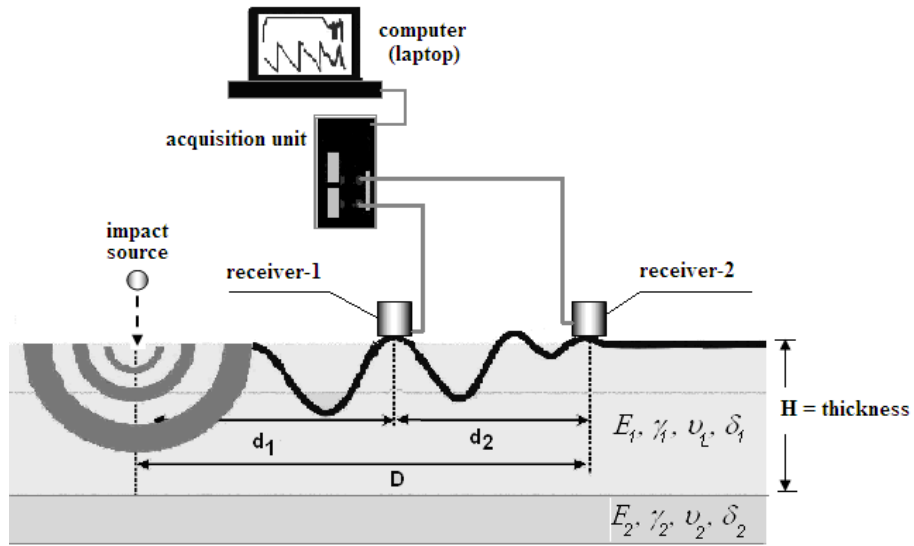
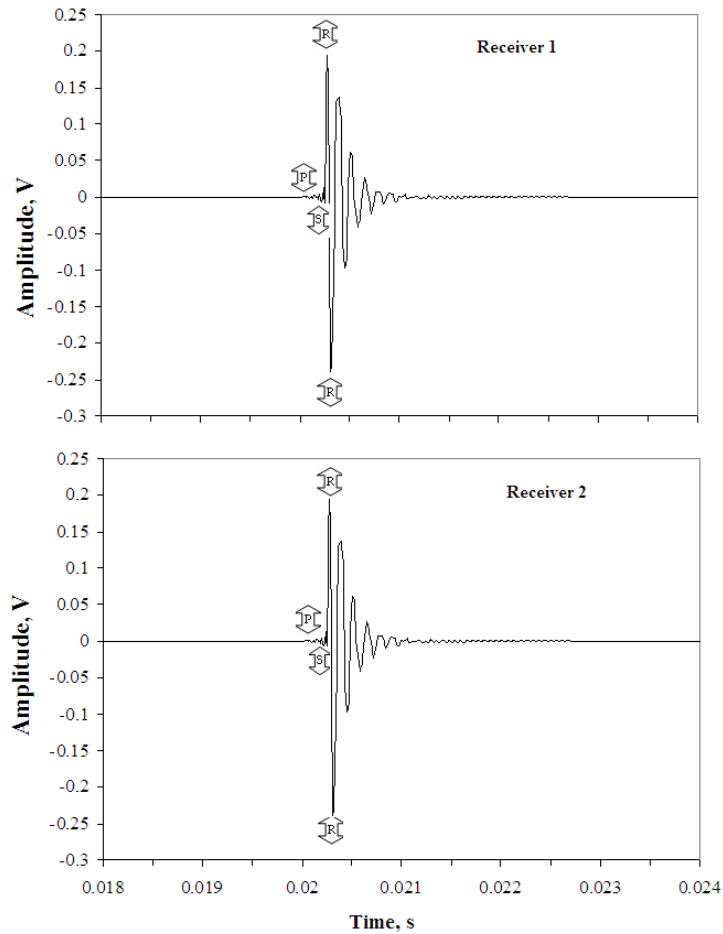
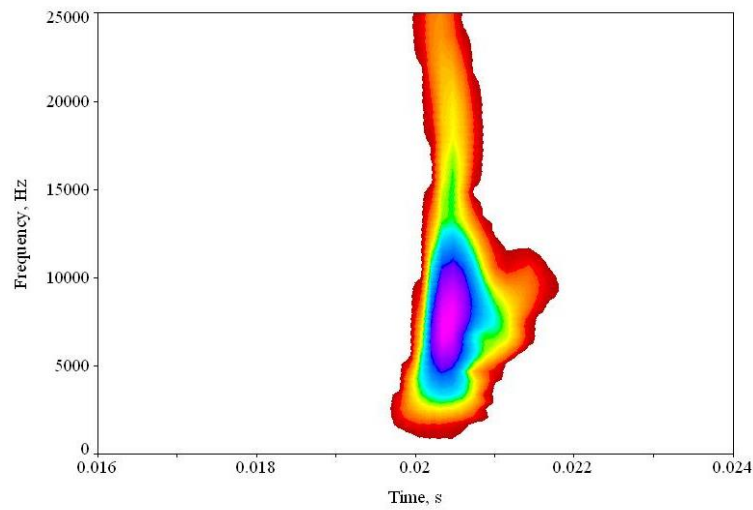
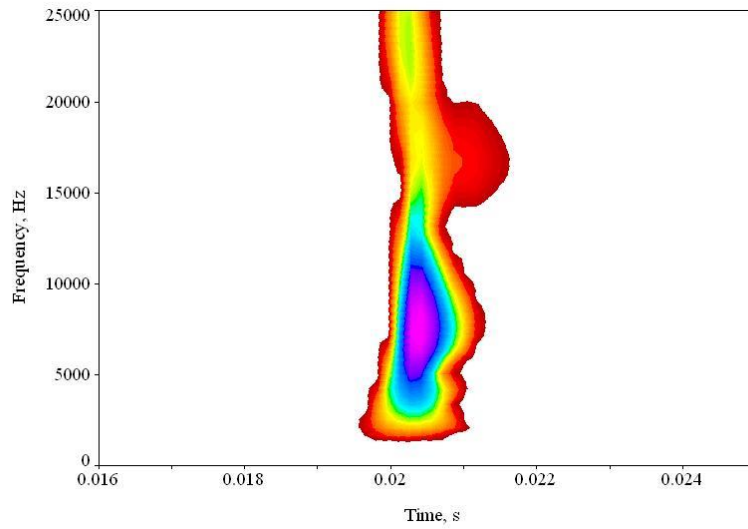


FIG. 2. Mid-point receivers configuration of WSSW measurement on pavement structure



1
2
3
4 **FIG. 3. Signal from WSSW measurement on a pavement structure**
5
6



47 **Fig. 4. Time-frequency plot of received signals from measurement**
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

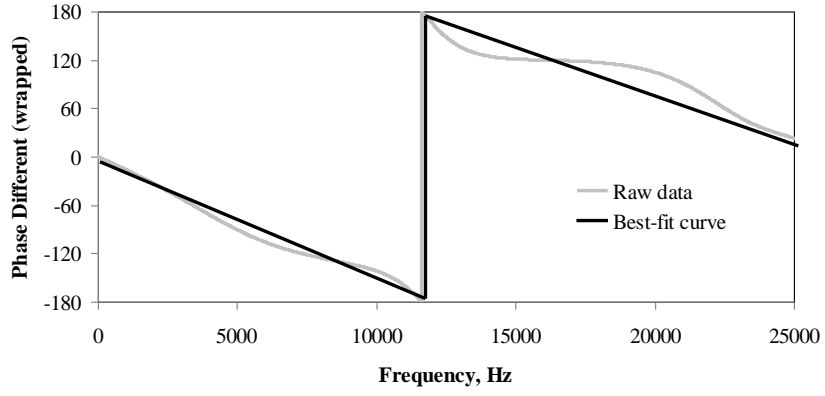


Fig.5. Comparison between raw data and best-fit curve of wrapped transfer function spectrum from measurement

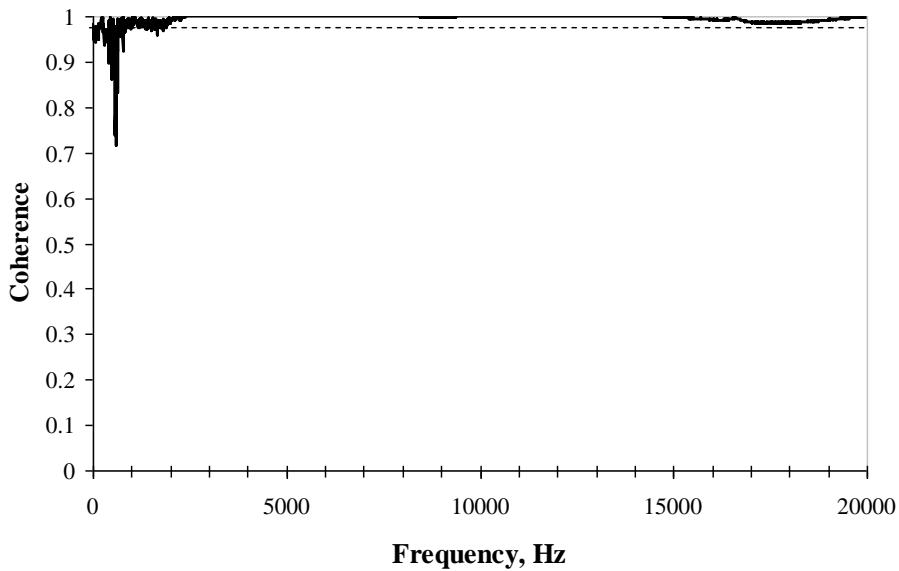


Fig. 6. Coherent function spectrum of received signals from measurement

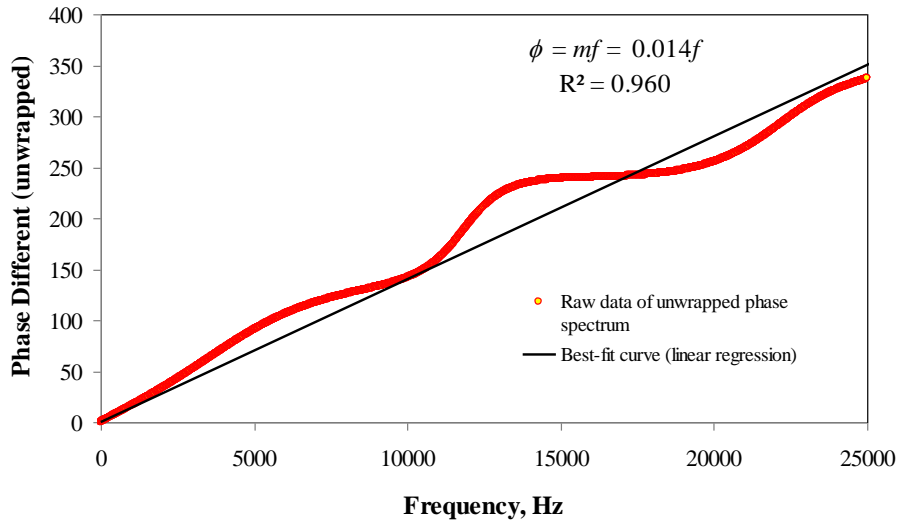


Fig. 7. Comparison between raw data and best-fit curve of unwrapped transfer function spectrum from measurement and slope analysis to obtain m value

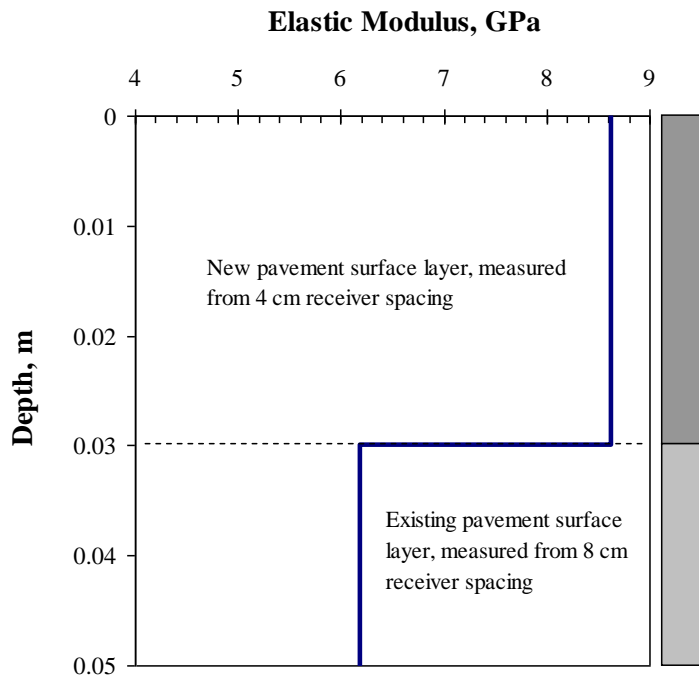


Fig. 8. Comparison between elastic modulus of an overlay and existing surface layer at pavement roads, Indonesia

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

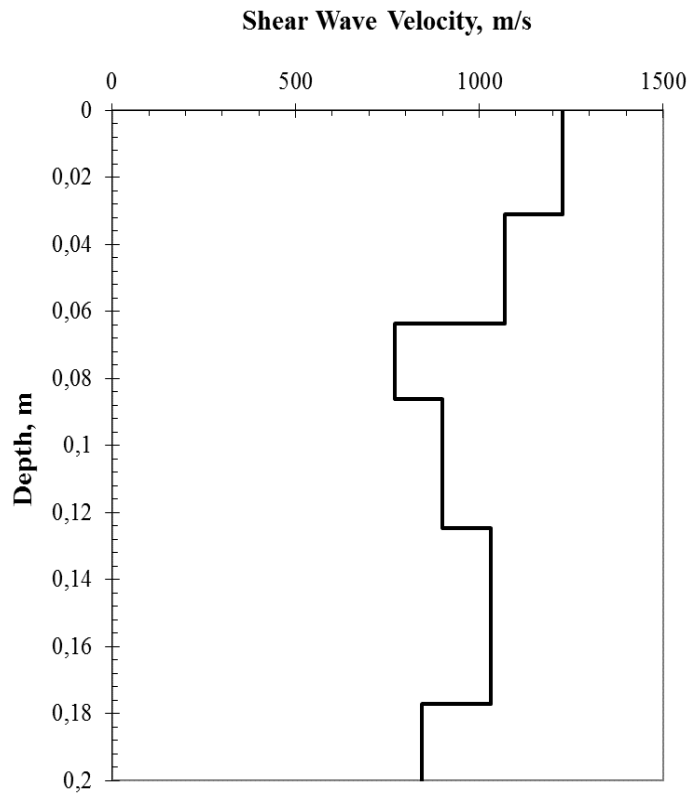


Fig. 9. The shear wave velocity profile from inversion of the experimental dispersion curve

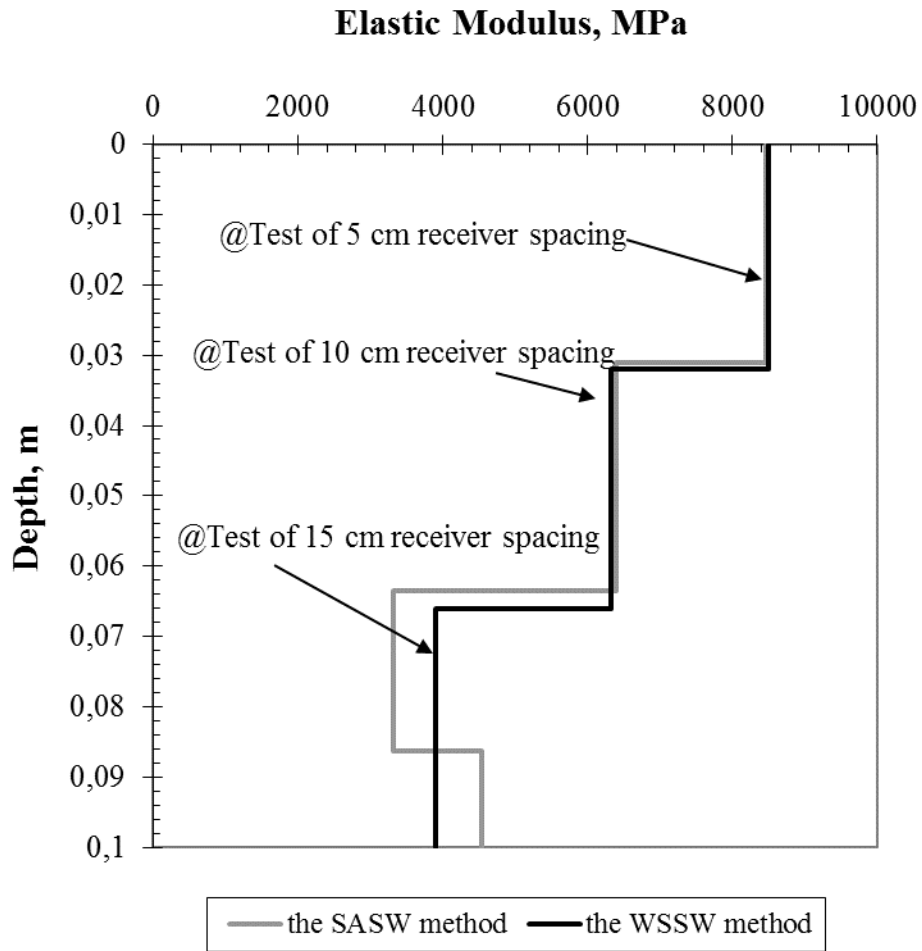


Fig. 10. The dynamic elastic modulus of the pavement profile from the SASW method and its comparison with the WSSW method

Auto Power Spectral Density Analysis for Measuring Energy Attenuation in a Layered Soil Site

Sri Atmaja P. Rosyidi

Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Anita Widianti

Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

ABSTRAK: Getaran yang berasal dari aktivitas konstruksi, gempa bumi dan pembebanan lalu lintas menjadi penting untuk diperhatikan karena getaran tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada struktur. Untuk menganalisis suatu getaran perlu mempertimbangkan beberapa kombinasi faktor yang mempengaruhi getaran tersebut yaitu karakteristik sumber getaran, kondisi setempat, perambatan gelombang seismik dan respon struktur. Pada umumnya, pengurangan getaran terhadap jarak dihasilkan dari dua komponen yaitu redaman geometrik dan redaman bahan. Redaman geometrik dipengaruhi kuat oleh tipe dan lokasi sumber gelombang dan redaman bahan lebih dipengaruhi oleh sifat tanah dan amplitudo getaran. Dalam studi ini, auto power spectral density (spektrum energi gelombang) digunakan untuk mengukur pengurangan energi dari redaman geometrik pada media tanah yang berlapis. Energi dari sinyal gelombang seismik diperoleh dengan menjumlahkan kuadrat amplitudo sinyal dari beberapa lokasi. Divergen dari energi tersebut yang merupakan perbedaan amplitudo sinyal dapat digunakan untuk mengidentifikasi resapan energi seismik dalam tanah. Dengan menganalisis pergerakan partikel dan energi dalam domain frekuensi, pengurangan rambatan gelombang dari suatu sumber getaran dapat diperhitungkan. Akhirnya, faktor pengurangan tanah dari beberapa lokasi tanah dan sumber gelombang yang berbeda dapat diinvestigasi dalam makalah ini.

Kata Kunci: auto-power spectral density, pengurangan, redaman tanah, seismik

ABSTRACT: Vibrations from construction activities, earthquake and traffic loading are important because they may cause damage to the adjacent structures. For the analysis of vibration related problems, it is necessary to consider the combined effect of several factors such as the characteristics of vibration sources, the site characteristics, the propagation of surface and body waves in the ground, and response of structures. Generally, the attenuation of vibrations with distance is composed of two factors: geometric damping and material damping. The geometric damping depends on the type and the location of vibration source and the material damping is related with ground properties and vibration amplitude. In this study, auto power spectral density was used for measuring energy attenuation of geometric damping in the layered soil site. The energy in a seismic wave signal is computed as the summation of the square of the signal amplitude at each point. The divergence of energy rate with respect to the signal amplitude difference can be used to discern characteristics of the energy dissipation of layered soil in the ground. By analyzing the measured particle motions and major energy component in the frequency domain, the attenuation of propagating waves generated by vibration source was characterized. Finally, soil attenuation factor from different sites and vibration sources were investigated.

Keywords: auto power spectral density, attenuation, soil damping, seismic

1 INTRODUCTION

Soil dynamic properties are important parameters used in geo-earthquake engineering analysis related to dynamic loading in low to

moderate-strain levels, e.g., ground amplification during earthquake, traffic loading, vibration from construction may cause damages. Infrastructural damages may be caused by vibrations induced differential

settlement as well as by vibration transmitted directly to the structures (Drabkin et al. 1996). In order to analyze vibrations related problems, it needs to consider the effect of several factors such as the characteristics of vibration sources, site characteristics, seismic waves propagation and response of structures (Massarsch 1993). Soil attenuation corresponding to soil damping ratio is one of soil dynamic properties used in the analysis of site characteristics and seismic waves propagation.

Attenuation in soil dynamics is a phenomenon that involves the interaction of several mechanisms that contributed to the energy dissipation of the seismic wave during dynamic excitation (Rix et al. 2000). Soil attenuation parameter is able to be determined by the radiation/geometric and material damping of the soil structure. The radiation/geometric damping depends on the type and location of the vibration source and the material damping is related to soil properties and vibration. The parameter can be in situ evaluated by using seismic methods, i.e., measurement of wave velocities propagating through soil medium.

The objective of this paper is to present the measurement of energy attenuation of seismic waves on the layered sites using the auto power spectral density. This method is effective used for evaluating in-situ attenuation factor of soil structures. Results from field study carried out at unsaturated soil site are also presented.

2 RESEARCH METHODOLOGY

2.1 Basic of Auto Power Spectral Density (PSD)

Auto power spectral density (PSD) is the frequency response of a random or periodic signal. It provides the information of average power which is distributed as a function of frequency. The PSD is deterministic, and for certain types of random signals, $x(t)$, i.e., signals recorded from seismic waves propagation is independent of time. This is useful because the Fourier transform of a random time signal is itself random, and therefore of little use calculating transfer relationships, i.e., finding the output of a filter when the input is random). The PSD of a random time signal $x(t)$ can be expressed in

one of two ways that are equivalent to each other as follows:

1. The PSD is the average of the Fourier transform magnitude squared over a large time interval.

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \right\} \quad (1)$$

2. The PSD is the Fourier transform of the auto-correlation function.

$$S_x(f) = \int_{-T}^T R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (2)$$

where

$$R_x(\tau) = E \{ x(t) x^*(t + \tau) \} \quad (3)$$

The power can be calculated from a random signal over a given band of frequencies as follows:

1. Total Power in $x(t)$:

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df = R_x(0) \quad (4)$$

2. Power in $x(t)$ in range $f_1 - f_2$:

$$P_{12} = \int_{f_1}^{f_2} S_x(f) df = R_x(0) \quad (5)$$

2.2 Vibration Attenuation

The decrease in amplitude (energy density) of the vertical component of the R -wave with distance due only to geometric configuration is called the radiation damping and can be expressed by:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n \quad (6)$$

where w_1 is the amplitude of vibration at distance r_1 from the source, w_2 is the amplitude at distance r_2 from the source and n the attenuation factor due to radiation damping which depends on the type of seismic wave, the position and size of the seismic source (Table 1). Values from both amplitudes of vibration can be taken from auto power spectral density (PSD) from field measurement.

Table 1. Attenuation radiation damping factor (n) with the source on the surface (Kim & Lee 1998).

Source Type	Induced Wave	n
Point	Body Wave	2.0
	Surface Wave	0.5
Infinite line	Body Wave	1
	Surface Wave	0

The vibration energy of R -wave is also dissipated during its propagation by the material damping of the geomaterial which is described by the damping ratio (ξ). An effective damping ratio of R -wave in layered medium can be defined and the value is frequency dependent. Its value may become very high for the first few modes of vibration.

There are several models to describe the combined effect of both the radiation and material damping. The Bornitz equation is one of the common models used and can be described by:

$$w_2 = w_1 \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^n e^{-\alpha(r_1-r_2)} \quad (7)$$

where α is the attenuation coefficient of the material (m^{-1}).

The attenuation coefficient of material depends on the type of material and the frequency of vibration. The estimated value of the attenuation coefficient can be obtained using the R -wave velocity (V_R), the frequency of vibration (f) and the damping ratio (ξ) using the following equation:

$$\alpha = \frac{2\pi f \xi}{V_R} \quad (8)$$

From the above relationship, the attenuation coefficient linearly increases with the vibration frequency and is inversely proportional with the R -wave velocity.

Alternatively, the independent-frequency attenuation coefficient (Athanasopoulos et al. 2000) can be obtained by writing Eq.8 in the form:

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{f} = \frac{2\pi\xi}{V_R} \quad (9)$$

2.3 Experimental Set Up

In this study, the spectral analysis of surface wave method was employed to collect the seismic surface wave data for soil sites evaluation. A configuration set up on the SASW measurement is shown in Figure 1. An impact source of 4 to 8 kg was used to generate seismic waves. These waves were then received using two 1 Hz and 4 Hz frequency natural vertical geophones. Thus, they were recorded by using a set of spectrum analyser for processing.

Several configurations at 0.5, 1, 2, 4, 8 and 16 m of the receiver and the source spacings were required in order to sample different soil depths. The configuration used in this measurement was the mid-point receiver spacings. In this configuration, the short receiver spacings with a high frequency source were used to sample the shallow layers of the soil profile while the larger receiver spacings with a set of low frequency sources were employed to sample the deeper layers.

SASW measurement was carried out in several soil sites, i.e., UMY Campus Indonesia, some locations in Purwakarta-Cikampek Road Pavement and Piyungan Road Pavement.

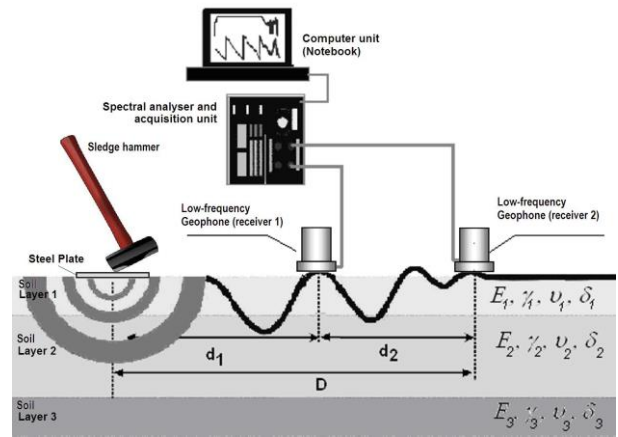


Fig 1. SASW measurement set up applied on the soil sites (Rosyidi & Taha 2012)

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 PSD from SASW Measurement

An example of the auto power spectrum density (PSD) from 8 cm receiver spacings of SASW measurement is shown in Fig 2. Using the bandwidth criteria, the useful frequency of the signal needed is in the range of 5.8 to 35

Hz. This frequency range of waves is the effective R-waves that propagate in the soft soil layer. The energy attenuation is also visibly identified from both spectrums.

3.2 Attenuation Analysis

An example of the auto power spectrum density (PSD) from 8 cm receiver spacings of SASW measurement is shown in Fig 2. Using the bandwidth criteria, the useful frequency of the signal needed is in the range of 50 to 200 Hz. This frequency range of waves is the effective R-waves that propagate in the soft soil layer. The energy attenuation is also visibly identified from both spectrums.

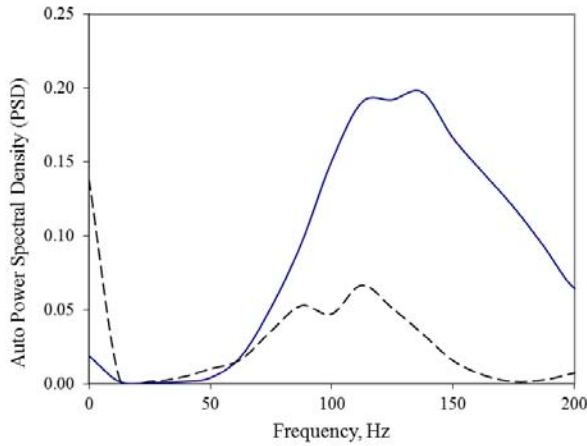


Fig. 2. PSD from SASW measurement on 8 m receiver spacing.

From Fig. 2, an experimental data trend of power spectrum ratio between both signals from PSD_2 (w_2) over the first signal magnitude of PSD_1 (w_1) versus frequency can be obtained. This ratio represents as the decay factor curve of frequency dependency from the R-wave motion (Fig. 3). An empirical correlation is subsequently performed on the experimental data of decay factor curve. The experimental regression equation is produced as:

$$\frac{w_2}{w_1} = 6.3494e^{-0.0028f} \quad (10)$$

The theoretical regression analysis of attenuation derived from Eq. 7 can then be written as:

$$\frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n e^{-\alpha_0(f)\Delta r} \quad (11)$$

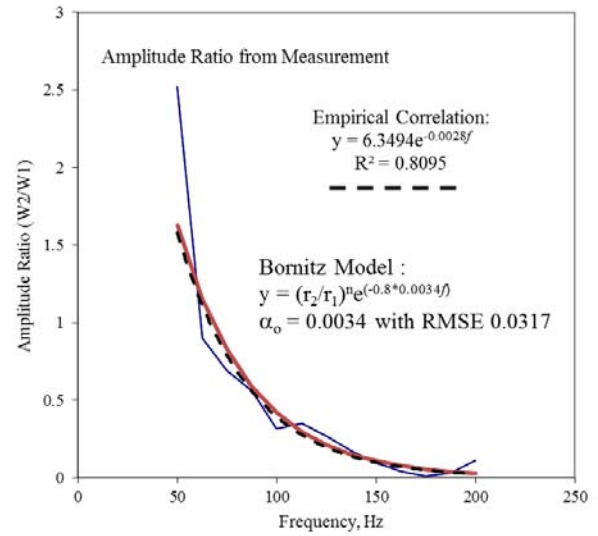


Fig. 3. Regression analysis of attenuation coefficient of the soil from auto power spectral density

The best-fit curve is then established between the decay factor of the experimental data (Eq. 10) and the theoretical regression analysis equation by trial and error for different values of α_0 from visual best-fit evaluation of the two curves. The best-fit value of frequency-independent attenuation coefficient of the soil is calculated as 3.4×10^{-3} s/m at frequency of 50 to 200 Hz. The root means square error (RMSE) for this fitting curve is found to be 0.0317. The complete results of frequency-independent attenuation factor for several soil sites obtained from this study are presented in Fig.4.

The values of the frequency-independent attenuation coefficient obtained from this study were compared with other researchers such as Yang (1995), Woods & Jedele (1985), Woods (1995), Athanasopoulos et al. (2000) and Rosyidi et al. (2008) as shown in Fig.5. Woods and Jedele (1985) classified soil groups from the frequency-dependent attenuation of the 5 Hz vibration. The attenuation factor of unsaturated soft soil from this study falls into Class 1 (soft soil) using Woods and Jedele (1985) classification and some of results is classified in Class 2. The results are also in good agreement with Athanasopoulos et al. (2000) that developed the range of attenuation coefficient for soils. The attenuation

coefficient obtained in this study is still within the upper and lower bound of the Athanasopoulos's (2000):

$$\alpha_0 = 3.17 \times 10^{-3} \times e^{-\frac{V_s}{500}} \text{ (best-fit)} \quad (11)$$

$$\alpha_0 = 1.15 \times 10^{-3} \times e^{-\frac{V_s}{500}} \text{ (lower bound)} \quad (12)$$

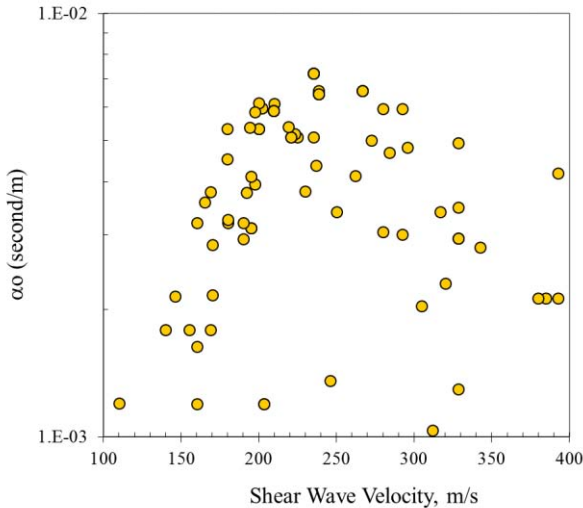


Fig.4. Results of independent frequency of attenuation coefficient from PSD and Bornitz attenuation analysis

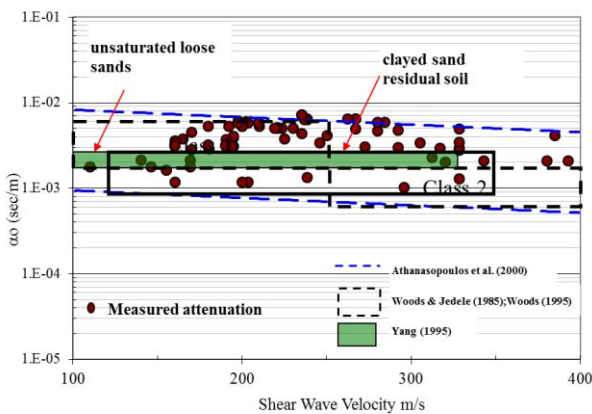


Fig.5. Attenuation factor from this study compared to the attenuation curve from other researchers.

Comparing to study conducted by Yang (1995) which also studied the frequency-independent attenuation coefficient for soil ranging from loose sand and soft clays to rock. Fig. 5 shows that the attenuation factor of this study is mostly close to the upper bound of the attenuation coefficient range obtained by Yang (1995) for unsaturated loose sand material which is most likely due to the difference in soil material.

Rosyidi et al. (2008) observed soil attenuation coefficient of the subgrade material using the spectral analysis of surface waves (SASW) method in sedimentary residual soil sites. From their study, the attenuation of residual soil subgrade was found ranging between $1.018 - 2.145 \times 10^{-3}$ s/m. Comparing with the results obtained from this study, it can also be classified into Class 1 (soft soil).

4 CONCLUSIONS

In this paper, an auto power spectrum density (PSD) technique was used for energy attenuation analysis of soil. The attenuation decay of seismic waves propagating in soil media generated from the ratio of amplitude which is calculated from the PSD. Soil attenuation is then obtained using the Bornitz equation. A good correlation was obtained between the attenuation factor obtained from this study compared to the previous studies.

Thus, it is shown that the characterization of the soil dynamics properties in terms of attenuation coefficient can be satisfactory obtained using the Auto-PSDW method with SASW method as a tool for data collection from the field measurement. In addition, this method has the advantage of being fast and non-destructive.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to give our sincere appreciation to the Ministry of Research, Technology and Higher Education for supporting this research through PUPT Grant 2015/2016.

REFERENCES

- Athanasopoulos, G.A., Pelekis, P.C., Anagnostopoulos, G.A. 2000. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* 19: 277-288.
- Drabkin, S., Lacy, H. & Kim, D.S. 1996. Estimating settlement of sand caused by construction vibration. *Journal of Geotechnical Engineering* 122(11): 920-928.
- Kim, D-S & Lee, J-S. 1998. Source and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil*

- Dynamic III. ASCE. Geotechnical Special Publication No.75 (Vol.2): 1507-1517.
- Massarsch, K.R. 1993. Man-made vibrations and solutions. Proc. 3rd Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering. St. Louis, Missouri, 1393-1405.
- Rix, G.J., Lai, C.G. & Spang, A.W., Jr. 2000. In situ measurement of damping ratio using surface waves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126(5): 472 – 480.
- Rosyidi, S.A.P. & Taha, M.R. 2012. Wavelet Spectrogram Analysis of Surface Waves Technique for Dynamic Soil Properties Measurement on Soft Marine Clay Site. In *Seismic Waves, Research and Analysis* (Ed. Masaki Kanao). Intech, Rijeka, Croatia.
- Rosyidi, S.A.P; Taha, R., Chik, Z. & Ismail, A. 2008. Determination of attenuation and geometric damping on clayey sand residual soil in irregular profile using surface wave method. Proc. 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1-6 October, 2008, Goa, India.
- Woods, R.D. & Jendele, L.P. 1985. Energy-attenuation relationships from construction vibrations. In G. Gazetas & E.T. Selig (ed.), *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*, Special Publication ASCE, New York, 229-246.
- Woods, R.D. 1995. Dynamic effects of pile installation on adjacent structures. *Vibration Problems in Geotechnical Engineering*. Special Publication of ASCE: 229-246.
- Yang, X.J. 1995. Evaluation of man-made ground vibration. Proc. 3rd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Conference Earthquake Engineering and Soil Dynamics 3, St. Louis (US(USA), 1345-1348.



WAVELET SPECTROGRAM ANALYSIS OF SURFACE WAVE METHOD FOR IN-SITU ATTENUATION AND DAMPING RATIO OF SOFT SOIL

S.A.P. Rosyidi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 55183, Bantul, Yogyakarta, Indonesia, atmaja_sri@umy.ac.id

Abstract

Soil attenuation and damping ratio are important parameters in soil dynamic analysis and design of structural dynamic. Both parameter can be obtained from the field measurement using the seismic measurement, e.g., the spectral analysis of surface wave (SASW). The SASW is one of seismic methods based on the dispersion of Rayleigh waves (R-waves) which is used to determine the shear wave velocity, shear modulus and depth of each layer of the soil profile. Seismic surface wave data detected in the seismic measurement are non-stationary in nature i.e. varying frequency content in time. Especially in the low frequency range measurement, i.e., in soft soil, the interested frequency of surface wave can be relatively low which can be less than 20 Hz. In these frequency values, the noisy signals may disturb in the identical frequency level of the surface wave signals generated from the source. In this paper, an improved technique of continuous wavelet transform (CWT) of derivative Gaussian function was employed in the seismic surface wave analysis in order to calculate the soil attenuation and damping of soft soils. The technique is then called as the the wavelet spectrogram analysis of surface wave (WSASW). There are two procedures used in the analysis, i.e., first, time-frequency wavelet spectrogram was utilized to select the response spectrum of interest from recorded surface waves. Second stage is a time-frequency wavelet filtering which was used to remove noisy distortions in the selected spectrogram based on simple concept of wavelet filtering. Detected strong ground noises were able to be filtered out from the signals. Consequently, denoised signals representing the interested waveform of surface wave were reconstructed by inverse wavelet transform algorithm. Finally, clear pattern of phase spectrum can be easily calculated. Results showed that the wavelet spectrogram analysis of surface wave (WSASW) method is able to identify and reconstruct better spectrum seismic and phase velocity dispersion curve from surface wave measurement. Based on reconstructed seismic spectrum and velocity dispersion curve, soil attenuation and damping ratio can be obtained well. This technique can be applied to solve problems related to non-stationary seismic wave at soft clay soil.

Keywords: damping ratio, attenuation, seismic, wavelet, surface waves



1. Introduction

Soil attenuation is one of important parameters in geo-earthquake engineering problems associated with dynamic loading at low to moderate-strain levels, e.g., ground amplification during earthquake [1]. The attenuation parameter of soil can be either determined from the radiation and material damping of the soil structure. Attenuation in soil dynamics is a phenomenon that involves the interaction of several mechanisms that contributed to the energy dissipation of the seismic wave during dynamic excitation [2]. The parameter can be in situ evaluated by using seismic methods, i.e., measurement of wave velocities propagating through soil medium. The spectral analysis of surface wave (SASW) is one of common seismic techniques used for this purpose. Much of the basis of the theoretical and analytical work of this method for soil investigation has been developed. Current developments of the SASW method can be found in [3].

Many in situ and laboratory tests have been used to evaluate attenuation parameter. Rix et al. [2] investigated surface wave measurements to determine the attenuation and damping ratio of a layered soil deposit. In their studies, an attenuation curve was constructed from the observed spatial attenuation of Rayleigh wave amplitudes and then was inverted to obtain the material shear damping ratio. However, seismic data used in surface wave analysis are non-stationary in nature i.e. varying frequency content in time. Fourier transform that usually used by many re-researchers in seismic measurements works by expressing any arbitrary periodic function of time with period as sum a set of sinusoidal, thus some information of non-stationary seismic data in analysis maybe lost. In addition, the inability of conventional Fourier analysis to preserve the time dependence and describe the evolutionary spectral characteristics of non-stationary processes require tools which allow time and frequency localization beyond customary Fourier analysis. Wavelet analysis is becoming a common tool for analyzing localized variations of power within a time series. By decomposing a time series into time-frequency spectrum (TFW), one is able to determine both the dominant modes of variability and how those modes vary in time. The wavelet analysis has been used in numerous studies in geotechnical investigation, i.e., in situ shear modulus [3], phase velocity of soil structures [4], soil damping ratio [5]. The objective of this paper is to present the ability of wavelet spectrogram analysis of surface wave (WSASW) to evaluate in-situ attenuation factor and soil damping ratio of soil structures. Result and its application from field study carried out at soft soil site are also presented.

2. Research Methodology

2.1 Wavelet Analysis

A wavelet can be defined as a function of $\psi(t) \in L_2(\mathfrak{R})$ with a zero mean localized in both time and frequency. By dilating and translating the wavelet $\psi(t)$, a family of wavelets can generally be produced as:

$$\psi_{\sigma, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) \quad (1)$$

where σ is the dilation parameter or scale and τ is the translation parameter ($\sigma, \tau \in \mathfrak{R}$ and $\sigma \neq 0$)

The continuous wavelet transform (CWT) is then defined as the inner product of the family wavelets $\Psi_{\sigma, \tau}(t)$ with the signal of $f(t)$ which is given as:

$$F_W(\sigma, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{\sigma}} \overline{\psi}\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) dt \quad (2)$$



where $\bar{\psi}$ is the complex conjugate of ψ and $F_W(\sigma, \tau)$ is the time-scale map. The convolution integral from equation 2 can be computed in the Fourier domain. In order to reconstruct the function $f(t)$ from the wavelet transform, Calderon's identity [6] can be used and is obtained as:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_W(\sigma, \tau) \bar{\psi}\left(\frac{t-\tau}{\sigma}\right) \frac{d\sigma}{\sigma^2} \frac{d\tau}{\sqrt{\sigma}} \quad (3)$$

$$C_\psi = 2\pi \int \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (4)$$

where $\hat{\psi}(\omega)$ is the Fourier transform of $\psi(t)$. The integrand in equation 4 has an integrable discontinuity at $\omega = 0$ and implies that $\int \psi(t) dt = 0$.

The total energy contained in a signal, $x(t)$, is defined as its integrated squared magnitude as follows:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (5)$$

The relative contribution of the signal energy contained at a specific σ scale and τ location in the CWT is given by the two-dimensional wavelet energy density function:

$$P_{F_W}(\mu, \xi) = |F_W(\sigma, \tau)|^2 \quad (6)$$

A plot of P_{F_W} is known as a scalogram which is analogous to the spectrogram and the power spectrum density (PSD) surface of the STFT (short-time-Fourier-transform). The scalogram can be integrated across σ and τ to recover the total energy in the signal as follows:

$$P_{F_W} = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{F_W}(\sigma, \tau) \frac{d\sigma}{\sigma^2} d\tau \quad (7)$$

where C_g is the admissibility constant of the wavelet function $\psi(t)$.

2.2 WSASW Procedure for Attenuation and Soil Damping Ratio Analysis

A proposed procedure used in attenuation analysis of soil structures is described in Figure 1 as follows.

1. Select the wavelet function and a set of scale, s , to be used in the wavelet transform. The different wavelet function may influence the time and frequency resolution. In this study, a Morlet wavelet function was selected as a mother wavelet in the CWT analysis.

A commonly used wavelet in CWT is the Morlet wavelet where its shape is a Gaussian-windowed complex sinusoid. It is defined in the time and frequency domains as follows:

$$\Psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{im\tau} e^{-t^2/2} \quad (8)$$



$$\hat{\psi}_0(s\omega) = \pi^{-1/4} H(\omega) e^{-(s\omega - m)^2 / 2} \quad (9)$$

where m is the wavenumber, and H is the Heaviside function. In this study, a Morlet wavelet is within an adjustable parameter m of 7 which is used. This parameter can be used for an accurate signal reconstruction of seismic surface waves in low frequency. In addition, the Gaussian's second order exponential decay used in time resolution plot results in the best time localization.

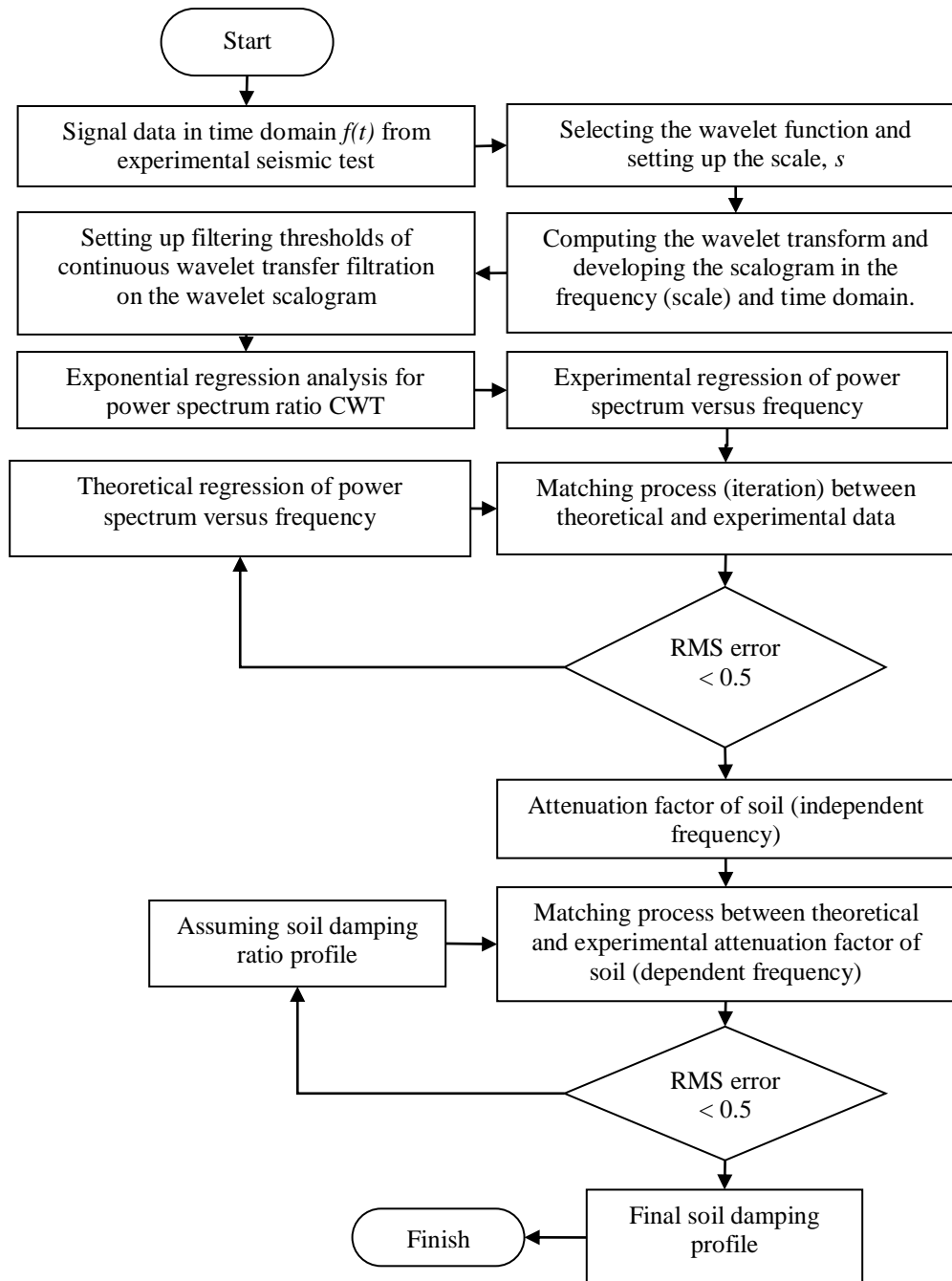


Fig. 1 – Flow chart of attenuation and soil damping ratio calculation in WSASW technique



2. Develop the wavelet scalogram by implementing the wavelet transform (Eq. 2) using computed convolution of the seismic trace with a scaled wavelet dictionary. Wavelet scale is calculated as fractional power of 2 using the formulation [7]:

$$S_j = S_0 2^{j\delta_i}, j = 0, 1, \dots, J \quad (10)$$

$$J = \delta_j^{-1} \log_2 \left(\frac{N\delta_t}{S_0} \right) \quad (11)$$

where, s_0 is smallest resolvable scale = $2\delta_i$, δ_i is time spacing, and J is largest scale.

3. Convert the scale dependent wavelet energy spectrum (scalogram) or power spectrum density of the signal to a frequency dependent wavelet energy spectrogram in order to compare directly with Fourier energy spectrum.
4. Perform the CWT filtration on the wavelet spectrogram by obtaining the time and frequency localization thresholds. In this study, the CWT filtration was developed by a simple truncation filter concept which only considers the passband and stopband. Threshold values in time and frequency domain are then set as the filter values between passband and stopband. It allows a straight filtering in each of the dimensions of times, frequencies and spectral energy. The noisy or unnecessary signals can be eliminated by zeroing the spectrum energy and consequently, they are fully removed when reconstructing the time domain signal. Thus, the interested spectrum of signals are to be passed when the spectrum energy is maintained in original value. A design of the CWT filtration is proposed by [3].
5. Reconstruct the time series of seismic trace using equation 3 and generate the power spectrum density or spectrogram from denoised signals.
6. Generate PSD ratio from both signals as experimental power spectrum ratio versus frequency using the linear regression.
7. Generate the theoretical regression of power spectrum density (amplitude) ratio versus frequency using following equation [5]:

$$\ln \left[\frac{W_f^{R_2}(u, s)}{W_f^{R_1}(u, s)} \right] = \ln \left[\left\{ \frac{R_1}{R_2} \right\}^n \{G(R) \cdot G(I) \cdot K(R)\} e^{-\alpha(f)(R_1 - R_2)} \right] \quad (12)$$

$$\ln \left[\frac{W_f^{R_2}(u, s)}{W_f^{R_1}(u, s)} \right] = k - \alpha(f)(\Delta R) \quad (13)$$

where, R_1 and R_2 = geophones distance from the sources (if using two geophones), $G(R)$ = geometric spreading factor, $G(I)$ = instrumentation correction factor and $K(R)$ = correction for refracted and transmitted waves, α = independent frequency-attenuation factor.

8. By matching the data of theoretical to the experimental regression line, the attenuation factor of soil structures can be obtained. By repeating the procedure outlined above the attenuation factor corresponding to each wavelength is subsequently generated.
9. An effective soil damping ratio of R-wave in layered medium can be defined from the attenuation analysis and the value is frequency dependent. Its value may become very high for the first few modes of vibration. Finally, to obtain the soil damping ratio profile from the attenuation curve, the inversion analysis by using the procedure proposed by [8] and [9] was performed.

2.3 Field procedure of surface wave measurement

In this study, the multi-channel of WSASW was employed to collect the seismic surface wave data for soil dynamic evaluation. A configuration set up on the WSASW measurement is shown in Fig. 2. An impact source of 8 to 12 kg and 20 to 25 kg dropped weight was used to generate seismic waves. These waves were then received using two 1-Hz frequency natural vertical geophones. Thus, they were recorded by using a set of spectrum analyser for processing (Fig. 2).

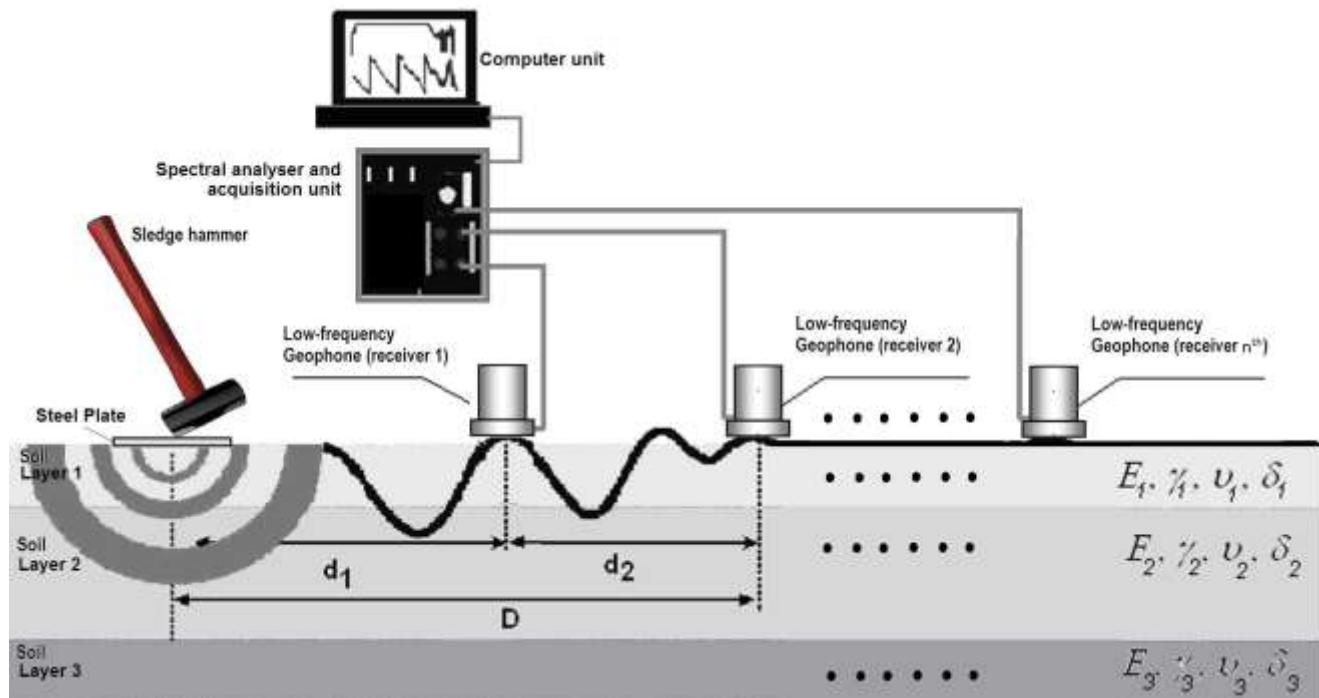


Fig. 2 – WSASW field measurement set up using multi-channel geophones on the soil sites

In order to collect seismic data in the field measurement, multi-channel geophones configuration of 1 and 2 m of the receiver spacings were required to sample different soil depths. The short receiver spacings with a high frequency source may be used to sample the shallow layers of the soil profile while the larger receiver spacings with a set of low frequency sources can be employed to sample the deeper soil layers.

3. Result and Discussions

3.1 Soil Properties of Test Site

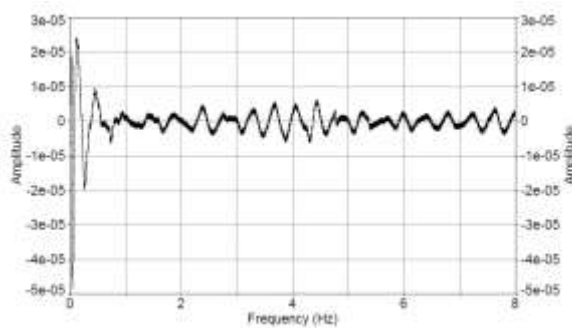
The soil tests were conducted in Kelang, Malaysia. From the site investigation, it was shown that the soil type is greyish clay with decayed wood at most of the soil layers of the subsoil stratum. The site was geologically classified as recent quaternary of dominantly alluvial deposits of soft marine clay with traces of organics.

3.2 Response Spectrum and Power Spectrum Density

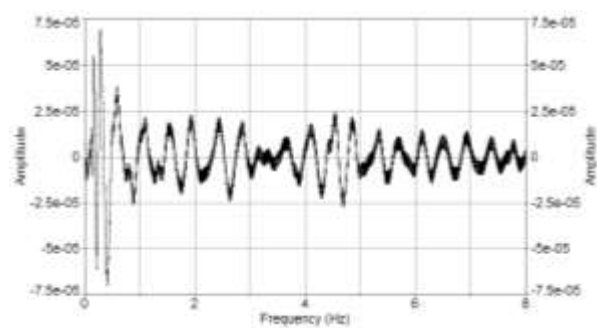
Fig. 3 shows the recorded signals from multiple impacts of a source. The seismic data was recorded using field configuration of 8 m receivers (geophones) spacing. From the recorded signals, it can be recognized that higher amplitude is measured for first mode of R-wave amplitude. It is also noted that the decreasing signal magnitude is identified as the R-wave attenuation in the soil layer which is an important characteristic for energy decrement. The waveform of seismic signal recorded in measurement is transient and non-stationary event. Weak recorded signal of seismic wave particularly in channel 2 is also identified as an effect of environmental noise which maybe produced from ground noise and man-made vibration. This means that either the input

signals or behaviours of system at different moments in time were not identical. When the signals were transformed into frequency domain (Figure 4), time-dependent behaviour of the seismic waves and noise events may be lost. In the energy content which these events present at different times and frequency, would not be picked up by a conventional Fourier analysis. It also cannot instantly separate the event of true seismic waves from noise signals. Consequently, it is difficult to interpret the correct energy of waves in both signals.

The time-frequency (TF) analysis of CWT was then employed to overcome the identification problem of spectral characteristic of non-stationary seismic wave signals and conduct the filtration analysis to reconstruct the interested signals from measurement. Filtration technique used in this analysis was recommended by [3] which is based on time-frequency thresholds. The technique can identify and remove the noise spectrum from the recorded signals. Denoising and cleaning noise signals are possible to improve the clarity of response spectrum analysis.

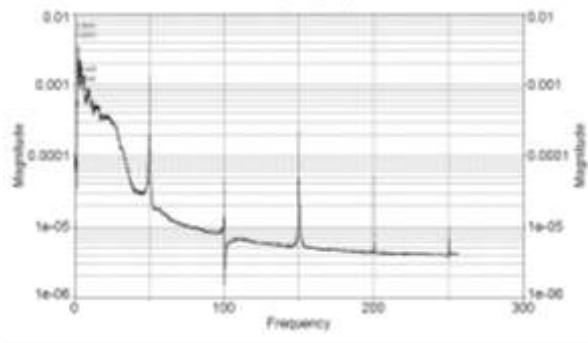


(a). Signal from Geophone 1

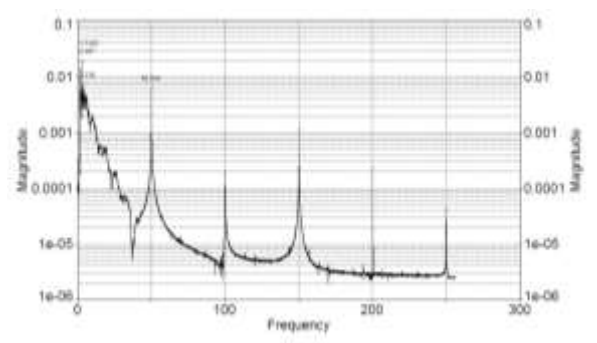


(a). Signal from Geophone 2

Fig. 3 – Seismic surface wave signals recorded from two channels of geophone with 8 m geophone spacing



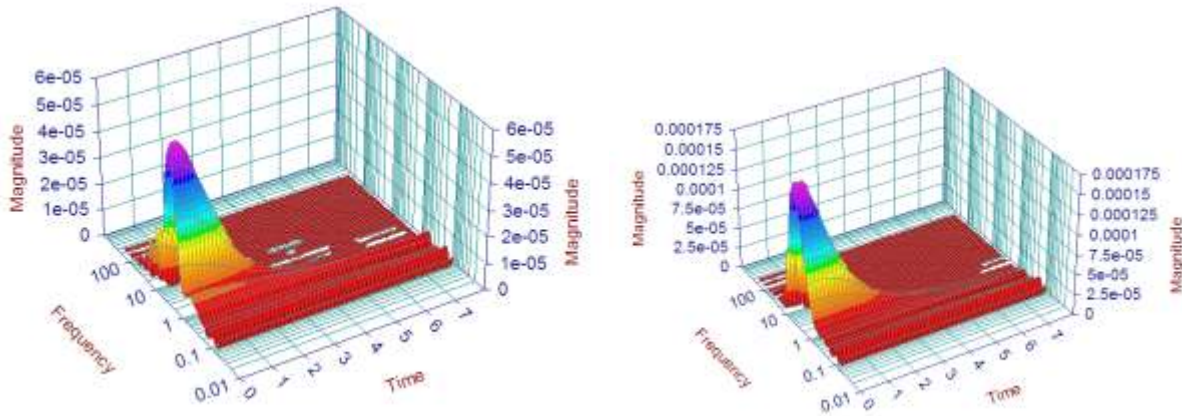
(a). FFT of signal from Geophone 1



(b). FFT result of signal from Geophone 2

Fig. 4 – Fourier amplitude from both signals

There is a primary step to set the thresholds for wavelet filtering. It is to define a region of time-frequency space. This is mainly used to select appropriate signal energy event and to reconstruct signal components. The time and frequency fields define limits in spectrogram filtering. It means that the noise signals are removed from the spectrogram and only seismic wave signals of interested exist. The inverse wavelet transform then gives back a denoised seismic signal. The power spectrum density of wavelet or spectrogram for both denoising signals is shown in Fig. 5. The spectrum range of the seismic waves of interest was found in the range of 5 to 30 Hz and 5 to 35 Hz for signals recorded on channel 1 and 2, respectively. The energy attenuation is also visibly identified from both spectrums.



(a). Signal from channel 1 (b). Signal from channel 2

Fig. 5 – Power spectrum density of wavelet or spectrogram from both denoised signals

3.3 Attenuation analysis and soil damping ratio

From Fig. 5, an experimental data trend of power spectrum ratio between both signals from logarithmic natural (\ln) function of spectrogram ($W_f^{R_2}$) over the first signal magnitude ($W_f^{R_1}$) versus frequency can be obtained. This ratio represents as the decay factor curve of frequency dependency from the R-wave motion (Figure 6). A simple linear regression analysis is subsequently performed on the experimental data of decay factor curve. The experimental regression equation is produced as:

$$\ln \left[\frac{W_f^{R_2}(u, s)}{W_f^{R_1}(u, s)} \right] = -0.0244(f) + 2.3025 \tag{14}$$

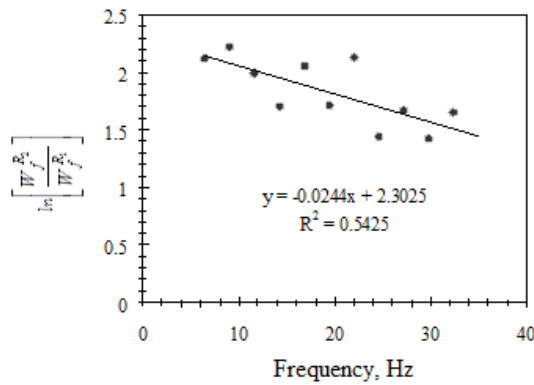


Fig. 6 – Regression analysis of attenuation coefficient of the soil from Fig. 5.

The theoretical regression analysis of attenuation derived from Eq. 13 can then be written as:

$$\ln \left[\frac{W_f^{R_2}(u, s)}{W_f^{R_1}(u, s)} \right] = -\alpha(f)(\Delta R) + k \quad (15)$$

$$= -8\alpha_0(f) + k$$

The best-fit curve is then established between the decay factor of the experimental data (Eq. 14) and the theoretical regression analysis equation (Eq. 15) by trial and error for different values of α_0 from visual best-fit evaluation of the two curves. The best-fit value of frequency-independent attenuation coefficient of the soil is calculated as 3.05×10^{-3} s/m at frequency of 5 to 35 Hz. The root-mean-square (RMS) error for this fitting curve is found to be 0.2.

By repeating the procedure for attenuation analysis in each frequency value for all seismic data, the experimental attenuation curve is subsequently generated. An example of attenuation versus frequency curve at the soil site is presented in Fig. 7. By knowing the experimental attenuation profile, the shear damping ratio can be obtained by inversion process. In the inversion analysis, the soil model is typically assumed as the homogeneous linear elastic layers over a half-space with model parameter of shear wave velocity, shear damping ratio and thickness for each layer. In this study, due to shear damping ratio is unknown data and there is no prior information from the previous field or laboratory soil data, therefore, it should be assumed with rational values for soil model parameter.

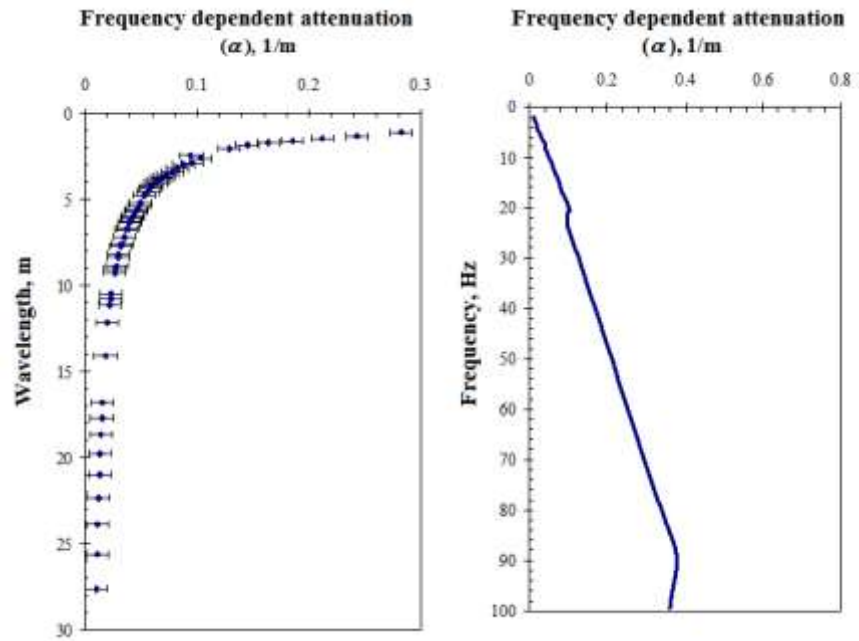


Fig. 7 – Frequency dependent attenuation profile in wavelength and frequency domain

The inversion analysis is processed by using Herrmann (1994) [11] code based on a weighted, damped, least-squares algorithm. Fig. 8 shows comparisons between the experimental attenuation curves and the theoretical attenuation data. Iteration processes were conducted to match between both experimental and theoretical curves. Fig. 8 presents the final profiles of shear damping ratio for the last iteration of the inversion process with lowest RMS error.

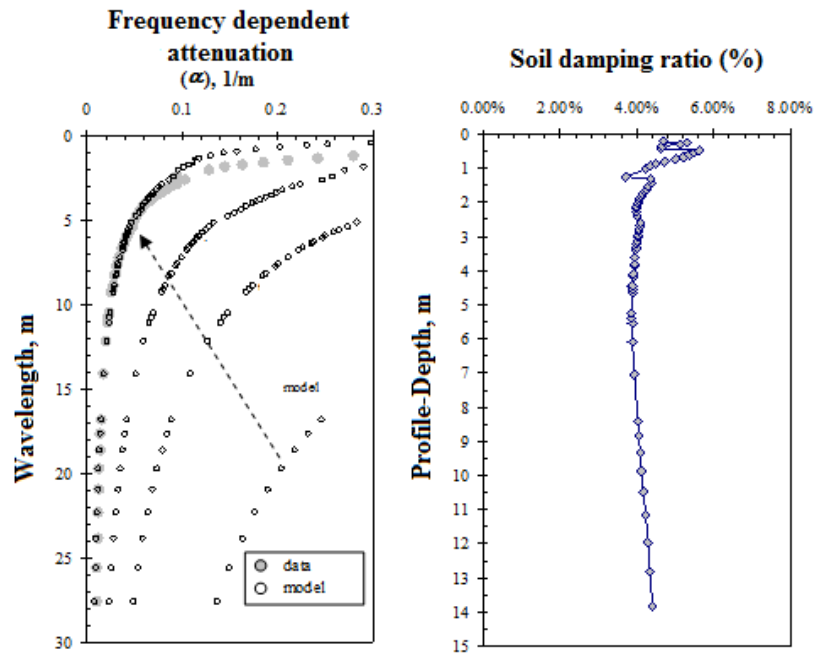


Fig. 8 – Soil damping ratio based on frequency dependent attenuation profile

4. Conclusion

In this paper, an improved seismic method of the wavelet spectrogram analysis of surface waves (WSASW) technique for measurement of the soil dynamic properties at soft soil site is presented. The denoising and reconstruction technique of the response spectrum from surface wave propagation on a soft soil using time-frequency spectrogram analysis of continuous wavelet transforms is also proposed. The 2-D wavelet spectrogram is able to clearly identify the various events of interest of the seismic surface waves and noisy signals. Based on the generated spectrogram, the thresholds for CWT filtration could be easily obtained. Consequently, the denoised signals of the seismic surface waves were able to be reconstructed by inverse wavelet transform considering the thresholds of the interested spectrum. Finally, the WSASW is also able to evaluate the soil dynamic properties, i.e., soil attenuation and damping ratio properties at soft clay soil site as performed in this study.

5. Acknowledgements

The support for this work was provided by the Ministry of Research, Technology and Higher Education, Indonesia. These supports are gratefully acknowledged.

6. References

- [1] Vucetic, M, Dobry, R (1991): Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(1), 89-107.
- [2] Rix, G.J., Lai, C.G., Spang, A.W., Jr. (2000): In situ measurement of damping ratio using surface waves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**(5), 472 – 480.
- [3] Rosyidi, S.A.P (2009): Wavelet Analysis of surface wave for evaluation of soil dynamic properties. *Ph.D. Thesis*, the National University of Malaysia, Bangi.
- [4] Kim, D-S, Park, H-C. (2002): Determination of dispersive phase velocities for SASW method using harmonic wavelet transform. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **22**, 675–684.



- [5] Rosyidi, S.A.P., Taha, M.R. (2012): Wavelet spectrogram analysis of surface waves technique for dynamic soil properties measurement on soft marine clay site. In *Seismic Waves, Research and Analysis* (Ed. Masaki Kanao). Intech, Rijeka, Croatia.
- [6] Daubechies, I. (1992): *Ten Lecturers on Wavelets*. Society of Industrial and Applied Mathematics, Pennsylvania.
- [7] Torrence, C., Compo G.P. (1998): A practical guide to wavelet analysis. *Bull. of the Amer. Meteor. Soc.*, **79**(1), 61-78.
- [8] Lai, C.G., Rix, G.J. (1998): Simultaneous inversion of rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. *Report No.GIT-CEE/GEO-98-2*, Georgia Institute of Technology.
- [9] Foti, S. (2004): Using Transfer Function for Estimating Dissipative Properties of Soils from Surface-Wave Data. *Near Surface Geophysics*, **2**(November 2004), 231-240.
- [10] Herrmann, R.B. (1994): *Computer Programs in Seismology*, User's Manual, St.Louis University, Missouri, USA.