

LAPORAN PENELITIAN HIBAH BERSAING



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

HALAMAN PENGESAHAN USULAN HIBAH BERSAING

1. Judul : Pengembangan Metode Integrated-Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (Integrated-SASW) Untuk Evaluasi Nilai Modulus Elastisitas Struktur Perkerasan Jalan di Indonesia
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap dan Gelar : Sri Atmaja Putra Jatining Nugraha Nasir Rosyidi, ST., M.Sc.(Civil. Struc.Eng.), P.Eng.
- b. Jenis Kelamin : Laki-laki
- c. NIK : UMY 123.046
- d. Jabatan Fungsional : Penata Muda/III A (Asisten Ahli)
- e. Jabatan Struktural : ---
- f. Bidang Keahlian : Teknik Transportasi dan Analisis Dinamik Material
- g. Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Sipil
- h. Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- i. Tim Peneliti

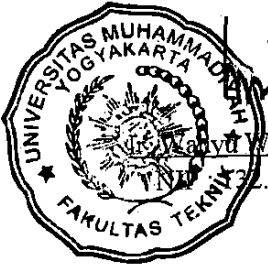
No.	Nama	Bidang Keahlian	Fakultas/Jurusan	Instansi
1.	Ir. Gendut Hantoro, MT.	Jalan Raya	Teknik (Teknik Sipil)	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
2.	Dr. Ir. Siegfried, M.Sc.	Bahan Perkerasan Jalan	Balai Bahan dan Perkerasan Jalan / Teknik (Teknik Sipil)	Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan / Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (Peneliti)
3.	Dr. Gunawan Handayani, MSCE.	Geofisika dan Geoteknik	Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (Fisika Kompleks)	Institut Teknologi Bandung (ITB)
4.	Prof. Dr. Mohd.Raihan Taha, BE.(Civil), MS.	Geoteknik dan Geo-Lingkungan	Teknik (Teknik Sipil) / Fac.Eng/Civil & Struc. Eng. Depart.	Universitas Muhammadiyah Yogyakarta/Universiti Kebangsaan Malaysia

- b. Biaya total yang diusulkan : Rp. 97.507.300,00
c. Biaya yang disetujui tahun 2007 : Rp. 44.000.000,00

Yogyakarta, 25 Oktober 2007

Mengetahui:
Dekan Fakultas Teknik,

Ketua Peneliti,



[Handwritten signature]
Widodo, MT.
2.005.745

Sri Atmaja P. Rosyidi, ST., M.Sc., P.Eng.
NIK UMY : 123.046

Menyetujui,
Ketua Lembaga Penelitian



[Handwritten signature]
Drs. Said Tuhuleley
NIK : 113.012

~~Handwritten signature or initials~~



RINGKASAN DAN SUMMARY

Permasalahan yang dihadapi dalam manajemen perkerasan jalan di Indonesia adalah menentukan instrumen penilaian struktural bahan jalan berupa parameter kekakuan jalan yang dapat dimonitor dalam periodisasi waktu yang berkelanjutan. Selain itu, minimnya dana pemeliharaan mikro maupun makro jalan-jalan di Indonesia menyebabkan diperlukannya suatu teknik evaluasi jalan yang inovatif, cepat dalam operasional, memiliki hasil akhir yang akurat dan sekaligus ekonomis. Untuk itu, dalam penelitian ini disusun untuk mengkaji suatu teknik pengujian lapangan (*in situ testing*) berupa metode analisis spektrum gelombang seismik buatan sebagai alternatif untuk mengatasi permasalahan di atas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan 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. Metode SASW dibangun berdasarkan analisis perambatan gelombang seismik Rayleigh pada media yang berlapis yang dihasilkan dari sumber mekanik buatan. Metode SASW telah dikenal mampu mendeteksi nilai kekakuan bahan pada lapisan tanah, berbagai lapisan fondasi bangunan maupun jalan dan anomali yang terletak pada suatu struktur. Metode SASW dalam penelitian ini dikembangkan sebagai model teknologi yang lebih inovatif yang mampu digunakan untuk aplikasikan pada pengawasan dan evaluasi kualitas bahan lapisan perkerasan jalan di Indonesia. Kerangka pertama berupa penyusunan 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. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik SASW terpadu memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai evaluator

PRAKATA

Assalamu'alaikum Wr.Wb.,

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

Laporan penelitian ini adalah hasil penelitian didanai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional melalui Pendanaan Penelitian Hibah Bersaing Nomor SP2H : 139/SP2H/PP/DP2M/III/2007 dan Nomor DIPA: 0145.0/023-04.0/-/2007. Penelitian ini mengambil fokus penelitian mengenai pengembangan metode *integrated-spectrum analysis of surface waves* (SASW) untuk evaluasi modulus elastisitas dinamik (nilai struktur) perkerasan jalan di Indonesia. Kajian ini merupakan topik penelitian utama yang dilakukan secara berkelanjutan dalam Roadmap Penelitian Kelompok Studi Teknik Transportasi, Program Studi S-I Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (UMY) mengenai pengembangan teknik seismik dalam bidang teknik sipil, khususnya untuk infrastruktur jalan dan jembatan.

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini, diantaranya Drs. Said Tuhuleley selaku Ketua Lembaga Penelitian dan Pengembangan Pendidikan UMY, Prof. Sung Ho Joh, BS., M.Sc., M.S., Ph.D. (Professor Geoteknik di Chung Ang University, Korea) yang telah banyak memberikan kemudahan dalam analisis seismik dan diskusi dinamika tanah, Khairul Anuar Mohd. Nayan (Ketua Kelompok Penelitian Seismik Universiti Kebangsaan Malaysia) yang memberikan kemudahan dalam penggunaan alat penganalisis seismik; Sumadi, Sadad dan Taufik selaku laboran di Divisi Laboratorium Bahan Perkerasan Jalan UMY; Wendy Ariyanto., ST., Heri Fitriansyah, Eko Budi B., Johan Putra P., Rahman Faudy, Aditya Hendrayana, Deny Jaya, Ario Muhammad dan Sridefi Lestari sebagai Asisten Peneliti di Laboratorium Teknik Transportasi UMY; Dayang Eki Yanwari selaku Asisten Peneliti Seismik pada penelitian ini 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 mengaplikasikan dan mengvalidasi teknik SASW-I ini pada ruas jalan di lapangan. Teknologi SASW ini merupakan teknik NDT baru dalam penilaian kekuatan struktur

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN DAN SUMMARY	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN I	
A. Latar Belakang Penelitian	1
1. Kondisi Perkerasan Jalan di Indonesia	1
2. Evaluasi Perkerasan Jalan di Indonesia	3
3. Pendekatan Teknik Seismik dalam Evaluasi Perkerasan Jalan	5
B. Perumusan Permasalahan dan Signifikansi Penelitian	6
C. Organisasi Laporan	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Gelombang Permukaan Rayleigh	9
B. Aplikasi Cooley-Tukey untuk Analisis Spektrum Gelombang R	30
C. Analisis Kecepatan Gelombang Rayleigh	32
D. Analisis Modulus Elastisitas Bahan dari Data Gelombang	33
E. Analisis Koefisien Pengurangan dan Rasio Peredaman dari Gelombang Permukaan	33
F. Analisis Perencanaan Tebal Perkerasan	35
BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	38
A. Tujuan Penelitian	38
B. Manfaat Penelitian	39
BAB IV METODE PENELITIAN	40
A. Tahapan Pertama Penelitian	40

2.	Analisis Kedua: Pembangunan Kurva Dispersi Eksperimen	47
3.	Analisis Kedua: Inversi Kurva Dispersi Eksperimen	57
4.	Analisis Ketiga: Pemilihan Instrumen dan Penyusunan Sistem SASW	66
B.	TAHAPAN KEDUA PENELITIAN	78
1.	Disain Model Perkerasan Jalan	78
2.	Pengujian Bahan Model Perkerasan Jalan	89
3.	Penentuan Parameter Ukur dalam Pengujian SASW	95
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		100
A.	Pengantar	100
B.	Simulasi Model 2 D dan 3 D pada Struktur Perkerasan Jalan	100
1.	Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen	100
2.	Model Artifisial Reguler (Teratur) dan Cenderung Homogen dengan Kecepatan Geser Rendah	118
3.	Model Artifisial Tidak Reguler (Teratur) dan Heterogen	120
4.	Simulasi Model 2 D dan 3 D terhadap Data Kurva Dispersi Lapangan	125
5.	Pembahasan Perbandingan Hasil Simulasi 2 D dan 3 D	137
C.	Pembangunan Model Fisik Perkerasan Jalan	139
1.	Sifat Fisik Bahan Penyusun Model	140
2.	Sifat Mekanik Bahan Penyusun Model	146
D.	Pengukuran dan Analisis Gelombang Seismik pada Model	152
1.	Hasil Pengukuran Gelombang	152
2.	Analisis Cooley-Tukey dan Spektrum Gelombang Auto	157
3.	Analisis Spektrum Gelombang Tenaga Silang dan Fungsi Transfer	161
E.	Analisis Mode Gelombang dan Impulse Response Filtering	167
F.	Analisis Kecepatan Fase Gelombang pada Perkerasan	173
G.	Hasil Inversi Profil Model Perkerasan Jalan	179
H.	Perbandingan Hasil SASW terhadap Pengujian Laboratorium dan Analisis Parameter	188
1.	Perbandingan Modulus Elastisitas	188
2.	Perbandingan Profil Tebal Model Perkerasan	193
3.	Kajian Sifat Reologi Bahan	194
I.	Sistem Analisis Terpadu	196
J.	Sistem Eksperimen Terpadu	202

	viii
A. Kesimpulan	207
B. Saran	209
DAFTAR PUSTAKA	210
LAMPIRAN	215

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Wilayah frekuensi untuk beberapa sumber gelombang yang digunakan	68
Tabel 4.2	Hasil kalibrasi sensitivitas sensor (27 Juli 2007)	69
Tabel 4.3	Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 1	85
Tabel 4.4	Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 2	86
Tabel 4.5	Perhitungan SN dan Checking Out Tebal Untuk Alternatif 3	88
Tabel 4.6	Penyesuaian Skala Model dan Jenis Perkerasan	91
Tabel 4.7	Persyaratan aspal keras penetrasi 60/70	90
Tabel 4.8	Ketentuan agregat kasar	90
Tabel 4.9	Ketentuan agregat halus	90
Tabel 4.10	Gradasi Agregat Untuk Campuran Aspal	91
Tabel 4.11	Ketentuan sifat-sifat campuran AC (Laston)	92
Tabel 4.12	Gradasi lapis pondasi agregat	92
Tabel 4.13	Sifat-sifat lapis pondasi agregat	93
Tabel 4.14	Lokasi pengujian bahan model perkerasan jalan	95
Tabel 4.15	Perencanaan wilayah frekuensi untuk pengujian	99
Tabel 5.1	Karakteristik lapisan pada sistem 1	101
Tabel 5.2	Karakteristik lapisan pada sistem 2	101
Tabel 5.3	Karakteristik lapisan pada sistem 3	119
Tabel 5.4	Karakteristik Dinamik Lapisan Sistem Profil Jalan Model Buatan	122
Tabel 5.5	Hasil pemeriksaan bahan aspal untuk model perkerasan	141
Tabel 5.6	Hasil pemeriksaan agregat kasar untuk lapisan permukaan	141
Tabel 5.7	Hasil pemeriksaan agregat halus untuk lapisan permukaan	142
Tabel 5.8	Hasil pemeriksaan agregat halus untuk lapisan fondasi	142
Tabel 5.9	Hasil pemeriksaan tanah dasar	145
Tabel 5.10	Hasil pemeriksaan Marshall	147
Tabel 5.11	Hasil pemeriksaan modulus resilien (MR) pada lapisan AC	148
Tabel 5.12	Kesimpulan hasil pemeriksaan modulus resilien (MR)	148
Tabel 5.13	Hasil pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi	149
Tabel 5.14	Statistik seluruh pengukuran DCP, CBR dan perhitungan	149

Tabel 5.15	Hasil pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastic prediksi	150
Tabel 5.16	Statistik seluruh pengukuran DCP, CBR dan perhitungan modulus elastik prediksi pada lapisan tanah dasar model perkerasan	151
Tabel 5.17	Hasil perhitungan modulus elastisitas profil model ATB	186
Tabel 5.18	Hasil perhitungan modulus elastisitas profil model AC	188
Tabel 5.19	Kesimpulan hasil pemeriksaan modulus resilien (MR)	189
Tabel 5.20	Perbandingan ketebalan lapisan model hasil pengukuran dan pengamatan	193
Tabel 5.21	Perhitungan kecepatan gelombang P	205

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penyebaran gelombang mekanik (Richart et al. 1970)	10
Gambar 2.2	Pola perambatan partikel gelombang Rayleigh (Rosyidi et al. 2005)	10
Gambar 2.3.	Sifat penetrasi gelombang R terhadap fungsi frekuensi dan panjang gelombang (Rosyidi et al. 2005)	11
Gambar 2.4	Hubungan antara rasio V_p dan V_s terhadap rasio Poisson pada beberapa kecepatan gelombang seismik (Prakash 1981)	12
Gambar 2.5	Profil media berlapis menegak dan homogenus mendatar (Rosyidi 2004)	17
Gambar 2.6	Analisis Bentuk Vektor Gelombang P (Rosyidi 2004)	19
Gambar 2.7	Analisis Bentuk Vektor Gelombang S (Rosyidi 2004)	19
Gambar 2.8.	Skematik beban luar sebagai tegangan dan perpindahan pada suatu lapisan (Rosyidi et al. 2005)	23
Gambar 2.9.	Model matrik global perpindahan dan kekakuan untuk profil berlapis	26
Gambar 2.10.	Model penyelesaian analisis 3 dimensi untuk media berlapis (Gucunski 1991)	27
Gambar 4.1.	Kerangka Penelitian Global dalam Hibah Bersaing	41
Gambar 4.2.	Sistem Analisis dalam Metode SASW	42
Gambar 4.3	Metode Penelitian untuk Menghasilkan Sistem SASW	43
Gambar 4.4	Model perambatan gelombang 2 D pada profil yang berlapis	44
Gambar 4.5	Model perambatan gelombang 3 Dimensi untuk media berlapis	44
Gambar 4.6	Skematik Alur Pemodelan dalam Pembangunan Kurva Dispersi	49
Gambar 4.7	Skema jalur dalam metode IRF, (a) menggunakan mode rendah, (b) menggunakan mode tinggi	51
Gambar 4.8	Contoh proses penyaringan (masking) untuk data tak dikehendaki	53
Gambar 4.9	Contoh perhitungan kecepatan fase (gelombang R) dari spektrum sudut fase	55
Gambar 4.10.	Skematik Alur Global Proses Inversi Kurva Dispersi Kecepatan Fase	59
Gambar 4.11.	Skematik Tahap dan Metode yang Digunakan dalam Inversi	

Gambar 4.12.	Skematik Alur Pemilihan dan Kalibrasi Instrumen untuk Sistem SASW	67
Gambar 4.13.	Sensor akselerometer yang digunakan dalam penelitian; tampak dari atas (ukuran diameter 6 mm) dan sketsa detail sensor piezoelektrik	68
Gambar 4.14	Proses kalibrasi sensor; kalibrator dan sensor tampak dari atas (a), tampak dari samping (b), dan set up proses kalibrasi keseluruhan (c)	69
Gambar 4.15	Penganalisis spektrum: unit akuisis (a) dan sebuah komputer notebook untuk operasi spektrum	
Gambar 4.16	Sumber gelombang mekanik: satu set bola baja dan palu ringan hingga berat	71
Gambar 4.17	Alur penyusunan sistem SASW terpadu/terintegrasi	72
Gambar 4.18	Set up pengukuran SASW	73
Gambar 4.19	Penentuan letak sensor dan sumber gelombang dalam pengukuran	74
Gambar 4.20	Skematik susunan sensor dan sumber gelombang mengikuti konfigurasi titik tengah sensor (CMP)	75
Gambar 4.21	Bagan alir analisis SASW terpadu untuk mendapatkan profilmodulus elastis dan nilai rasio pelemahan	76
Gambar 4.22.	Penentuan letak sensor dan sumber gelombang dalam pengukuran integrasi impact echo dan SASW	77
Gambar 4.23	Skematik penentuan tebal perkerasan jalan menggunakan metode impact echo	78
Gambar 4.24	Ketentuan Perencanaan Menurut AASHTO'93	84
Gambar 4.25.	Sistem perkerasan ideal untuk 500,000 CESA	85
Gambar 4.26.	Sistem perkerasan untuk 200,000 CESA	86
Gambar 4.27.	Sistem perkerasan untuk 300,000 CESA	88
Gambar 4.28	Skematik alur pengujian SASW pada model perkerasan pada tahun penelitian I dan rencana tahun penelitian II	96
Gambar 5.1	Sistem Profil Model Awal untuk Proses Simulasi 2 D dan 3 D pada Profil Artifisial Reguler dan Homogen	101
Gambar 5.2	Kurva eksperimen kecepatan fase dari Rosyidi et al. (2005)	102
Gambar 5.3	Grafik Profil SMP untuk variasi rasio $\lambda - H$	103
Gambar 5.4	Profil SMP Analisis 2 D untuk variasi rasio $\lambda - H$ pada model I	104
Gambar 5.5	Profil SMP 1 hingga SMP 6 analisis 2 D untuk model I	105
Gambar 5.6	Profil SMP 6 hingga SMP 10 untuk analisis 2 D model I	105

Gambar 5.8	Profil hasil simulasi analisis 2 D untuk sistem 1 dengan parameter inversi Vs	107
Gambar 5.9	Nilai RMS untuk profil hasil simulasi sistem 1 dengan parameter inversi Vs dan H	107
Gambar 5.10	Hasil analisis resolusi untuk profil akhir hasil simulasi analisis 2 D model 1	109
Gambar 5.11	Profil SMP Analisis 2 D untuk Variasi Rasio λ - H pada Model 2	110
Gambar 5.12	Profil SMP 1 hingga SMP 6 untuk Variasi Rasio λ - H Model 2	110
Gambar 5.13	Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi Vs	111
Gambar 5.14	Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi Vs pada Proses Inversi ke-1 hingga ke-6	112
Gambar 5.15	Profil Hasil Simulasi Analisis 2 D Untuk Sistem 2 dengan Parameter Inversi VS pada Proses Inversi ke-6 hingga ke-10	113
Gambar 5.16	Hasil Analisis Resolusi untuk Profil Akhir Hasil Simulasi 2 D Model 2	114
Gambar 5.17	Profil SMP Analisis 3 D untuk Variasi Rasio λ - H pada Model 2	115
Gambar 5.18	Profil SMP 1 hingga SMP 8 Variasi Rasio λ - H untuk Analisis 3 D Model 2	115
Gambar 5.19	Profil Hasil Simulasi Untuk Analisis 3 D Sistem 2 dengan Parameter Vs	116
Gambar 5.20	Profil Hasil Simulasi Untuk Analisis 3 D Sistem 2 dengan Parameter Vs	116
Gambar 5.21	Detail Kesesuaian Kurva Teori Simulasi 3 D Profil ke-1 dan ke-6 terhadap Kurva Eksperimen Rosyidi et al. (2005)	117
Gambar 5.22	Hasil Analisis Resolusi untuk Profil Akhir Hasil Simulasi 3 D Model 2	118
Gambar 5.23.	Perbandingan hasil simulasi 2 D dan 3 D untuk profil model sistem 3	119
Gambar 5.24	Kurva dispersi teori 2 D dan 3 D untuk profil artifisial sistem 4	121
Gambar 5.25	Perbandingan profil pendiskritan dan hasil inversi sederhana pada model 2 D dan 3 D terhadap profil sistem 4	123
Gambar 5.26	Sistem Profil Model Sistem 5 untuk Proses Simulasi 2 D dan 3 D pada Model Buatan Perkerasan Jalan	124

Gambar 5.28	Profil Model SMP untuk Analisis Model 2 D dan 3 D untuk profil data Widodo dan Rosyidi (2007)	127
Gambar 5.29	Kurva dispersi hasil simulasi model 2 d dan 3 D terhadap kurva dispersi eksperimen Jalan Prambanan – Pakem dari Widodo dan Rosyidi (2007)	127
Gambar 5.30	Perbandingan Profil Model 2 D dan 3 D di Jalan Prambanan – Pakem	129
Gambar 5.31	Hasil Analisis Resolusi Lapisan Profil Model 2 D dan 3 D di Jalan Prambanan – Pakem	130
Gambar 5.32	Fungsi sumber gelombang untuk analisis FEM	131
Gambar 5.33	Hasil simulasi FEM terhadap parameter simpangan gelombang pada observasi waktu 0,05 detik	132
Gambar 5.34	Hasil simulasi FEM terhadap parameter kecepatan gelombang pada observasi waktu 0,05 detik	133
Gambar 5.35	Hasil simulasi FEM terhadap parameter normal stress gelombang pada observasi waktu 0,05 detik	134
Gambar 5.36	Hasil simulasi FEM terhadap parameter shear stress gelombang pada observasi waktu 0,05 detik	135
Gambar 5.37	Hasil simulasi FEM terhadap simpangan, kecepatan dan percepatan gelombang	136
Gambar 5.38	Perbandingan hasil simulasi FEM dan proses analitik pada kurva dispersi kecepatan fase	137
Gambar 5.39	Layout model perkerasan dalam penelitian	139
Gambar 5.40	Model perkerasan jalan pada persiapan lapisan tanah dasar (a) dan pekerjaan pemadatan lapisan perkerasan (b)	140
Gambar 5.41	Gradasi untuk ukuran agregat kasar (CA) untuk lapisan permukaan	143
Gambar 5.42	Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) untuk lapisan permukaan	143
Gambar 5.43	Gradasi untuk ukuran agregat kasar (CA) untuk lapisan fondasi	143
Gambar 5.43	Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) untuk lapisan fondasi	144
Gambar 5.44	Gradasi untuk ukuran agregat halus (FA) untuk lapisan fondasi	144
Gambar 5.45	Gradasi untuk ukuran agregat kasar (CA) yang mengandung fraksi agregat pipih untuk lapisan fondasi	144
Gambar 5.45	Gradasi untuk ukuran agregat medium (MA) yang mengandung fraksi agregat pipih untuk lapisan fondasi	145

Gambar 5.47. Hasil pengukuran DCP pada lapisan fondasi model perkerasan	149
Gambar 5.48. Hasil pengukuran DCP pada lapisan tanah dasar dipadatkan model perkerasan	150
Gambar 5.50 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan AC	152
Gambar 5.51 Hasil rekaman sensor kedua untuk jarak antar sensor 3 cm pada lapisan AC	153
Gambar 5.52 Spektrum simpangan sensor pertama dalam jarak sensor 3 cm lapisan AC	154
Gambar 5.53 Spektrum simpangan sensor kedua dalam jarak sensor 3 cm lapisan AC	155
Gambar 5.54 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 3 cm model ATB	155
Gambar 5.55 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 6 cm model AC	156
Gambar 5.56 Hasil rekaman sensor pertama untuk jarak antar sensor 100 cm model AC	157
Gambar 5.57 Diagram alir proses FFT untuk tampilan spektrum	158
Gambar 5.58 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 3 cm	159
Gambar 5.59 Spektrum-auto density untuk jarak sensor 40 cm	160
Gambar 5.60 Spektrum-tenaga silang dalam bentuk kompleks untuk jarak sensor 3 cm	161
Gambar 5.61 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 3 cm	162
Gambar 5.62 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 48 cm	163
Gambar 5.63 Spektrum-tenaga silang dalam Nichols/Nyquist untuk jarak sensor 100 cm	163
Gambar 5.64 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 3 cm	164
Gambar 5.65 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 48 cm	164
Gambar 5.66 Spektrum fase-rekonstruksi dari pengukuran 100 cm	165
Gambar 5.67 Spektrum koheren hasil analisis untuk jarak sensor 3 dan 48 cm	166
Gambar 5.68 Hasil IRF dan rekonstruksi spektrum fase jarak 3cm	167
Gambar 5.69 Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak sensor 3 cm	168
Gambar 5.70 Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak	

Gambar 5.71	Tampilan spektrum fase dari hasil pengukuran dan rekonstruksi untuk jarak sensor 6 cm	169
Gambar 5.72	Hasil analisis spektrum Gabor dan wavelets untuk jarak sensor 12 cm	170
Gambar 5.73	Spektrum fase dan spektrum Gabor jarak sensor 60cm	171
Gambar 5.74	Spektrum fase dan spektrum Gabor jarak sensor 100 cm	171
Gambar 5.75.	Penyaringan respon impuls mode fundamental pada jarak 100 cm	172
Gambar 5.76	Hasil akhir kurva dispersi dari proses IRF	173
Gambar 5.78	Analisis kecepatan fase untuk jarak sensor 3 cm	174
Gambar 5.79	Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk model ATB	175
Gambar 5.80	Data rerata global kurva sebaran eksperimen untuk model ATB	176
Gambar 5.81	Kurva sebaran eksperimen gabungan/komposit untuk model AC	176
Gambar 5.82	Data rerata global kurva sebaran eksperimen model AC	177
Gambar 5.83	Analisis tomografi terhadap kurva sebaran eksperimen untuk model ATB	178
Gambar 5.84	Profil SMP diperoleh dari beberapa variasi rasio $H-\lambda$	180
Gambar 5.85	Perbandingan kurva dispersi teori dari beberapa profil SMP terhadap kurva eksperimen pada model ATB	180
Gambar 5.86	Profil SMP berdasarkan variasi rasio $H-\lambda$ dan nilai RMS yang dihasilkan	181
Gambar 5.87	Kurva dispersi teori hasil iterasi 1 terhadap kurva eksperimen	181
Gambar 5.88	Kurva dispersi teori hasil iterasi 2 terhadap kurva eksperimen	182
Gambar 5.89	Kurva dispersi teori hasil iterasi 3 terhadap kurva eksperimen	182
Gambar 5.90	Kurva dispersi teori hasil iterasi 4 terhadap kurva eksperimen	183
Gambar 5.91	Kurva dispersi teori hasil iterasi 5 terhadap kurva eksperimen	183
Gambar 5.92	Kurva dispersi teori hasil iterasi 6 terhadap kurva eksperimen	184
Gambar 5.93	Kurva dispersi teori hasil iterasi 8 terhadap kurva eksperimen	184
Gambar 5.94.	Perbandingan profil kecepatan gelombang geser hasil analisis inverse untuk model perkerasan ATB	185
Gambar 5.95.	Hasil resolusi analisis inverse untuk profil kedelapan model ATB	186
Gambar 5.96.	Profil kecepatan gelombang geser untuk model perkerasan AC	187

Gambar 5.98 Perbandingan nilai modulus elastisitas dari SASW dan prediksi modulus elastik dari Persamaan Shell (1978)	191
Gambar 5.99 Korelasi modulus elastisitas pengujian SASW terhadap pendekatan modulus dari pengujian DCP-CBR untuk lapisan fondasi dan tanah dasar	192
Gambar 5.100 Hubungan antara force dan recoverable strain pada pendekatan kajian reologi bahan modulus elastisitas dari pengujian SASW dan modulus resilien	195
Gambar 5.101 Pengaruh suhu terhadap kecepatan fase	196
Gambar 5.102 Perakaman sinyal dalam domain waktu untuk sensor pertama dan kedua pada jarak sensor 50 mm	197
Gambar 5.103 Spektrum kuasa auto pada kedua sensor untuk jarak 50 mm	198
Gambar 5.104 Spektrum fungsi koheren untuk jarak sensor 50 mm	199
Gambar 5.105 Rasio amplitudo di kedua sensor terhadap frekuensi pada pengukuran jarak sensor 50 mm	200
Gambar 5.106 Nilai koefisien pengurangan terhadap nilai kecepatan gelombang geser	201
Gambar 5.107 Konfigurasi sistem eksperimen SASW terpadu	202
Gambar 5.108 Hasil pengukuran sistem SASW terpadu	203
Gambar 5.109 Rekaman data gelombang sensor pertama	204
Gambar 5.110 Rekaman data gelombang sensor kedua	204
Gambar 5.111 Rekaman data gelombang sensor kedua	205

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN I DOKUMENTASI PENELITIAN	215
LAMPIRAN II PROFIL PENGEBORAN DEKAT LOKASI MODEL PERKERASAN DI UMY	216
LAMPIRAN III INSTRUMEN PENELITIAN	217
LAMPIRAN IV PERSONALIA TENAGA PENELITIAN	218