

Kinerja dan Verifikasi Teknik Seismik Gelombang Permukaan Terintegrasi untuk Pengukuran Modulus Elastisitas Tanah Dasar

(Performance and Verification of Integrated Spectral Analysis of Surface Wave for Pavement-Subgrade Elastic Modulus Measurement)

SRI ATMAJA P. ROSYIDI, SIEGFRIED

ABSTRACT

An integrated-spectral analysis of surface waves (ISASW) test has been recently proposed as an alternative technique in pavement evaluation and monitoring. ISASW technique is developed from the spectral analysis of surface wave (SASW) method which has been a well known nondestructive testing (NDT) for geotechnical and pavement structures. Surface wave propagation between a set of receivers were transformed to frequency domain using fast Fourier transform (FFT). Therefore, a phase spectrum was produced for measuring the time lag between receivers. A wavelet filtering on impulse response was used for constructing an enhanced phase spectrum. Using phase different method, an experimental dispersion curve was generated. Inversion analysis based on the 3D stiffness matrix method was then performed in order to produce the shear wave velocity profile. The elastic modulus of pavement layer was calculated based on the linear elastic theory. In this paper, the performance of ISA SW measurement for determining the elastic modulus of pavement subgrade is presented in this paper. Verification on its elastic modulus obtained from ISASW technique was also conducted by using falling weight deflectometer (FWD) test. The result shows that the dispersion curves obtained in the ISASW test are sensitive to indicate the stiffness change in each layer of a pavement structure. Stiffer layer, i.e., pavement surface layer, can be identified by the parameter of high frequency and phase velocity range; and vice versa. ISASW technique is also able to comprehensively investigate the elastic modulus of subgrade layer in existing pavement without any destruction. A good agreement of elastic modulus of subgrade layer from ISASW and FWD test was also presented.

Keywords: surface waves, falling weight deflectometer, pavement, elastic modulus

PENDAHULUAN

Bermula dari teknik analisis spektrum gelombang permukaan (*spectral-analysis-of-surface-wave*, SASW) yang telah diperkenalkan oleh Nazarian dan Stokoe (1984) untuk investigasi parameter dinamika tanah, teknologi analisis gelombang permukaan untuk evaluasi perkerasan jalan di Indonesia telah dikembangkan secara berkelanjutan oleh Rosyidi et al. (2002; 2003a,b; 2004a,b; 2005; 2006); Rosyidi dan Taha (2004), Rosyidi dan Ikhsan (2005), Rosyidi (2004; 2005). Dalam perkembangannya, Rosyidi et al. (2007; 2008a,b) telah mengusulkan suatu teknik

analisis spektrum gelombang permukaan terpadu (*integrated-spectral analysis of surface wave*, ISASW) untuk penilaian jalan. Teknik pengembangan ini memiliki keunggulan mampu menganalisis kekuatan bahan jalan dan rasio pelemahan struktur jalan secara simultan untuk jenis perkerasan lentur. Nilai modulus elastisitas dari pengukuran ISASW selanjutnya dapat digunakan untuk memprediksi kekuatan struktur perkerasan (SN, *structural number*) bahan perkerasan jalan terpasang. Dengan demikian, depresiasi kekuatan jalan di masa yang akan datang dapat dianalisis.

Dalam sistem perkerasan jalan, peranan kekakuan tanah dasar (*subgrade*) sangat

signifikan untuk mendukung lapisan perkerasan yang ada di atasnya. Kualitas tanah dasar menjadi salah satu faktor yang menentukan kinerja sistem perkerasan jalan. Dengan demikian, sistem evaluasi dan pengawasan kualitas tanah dasar menjadi sangat penting untuk dikembangkan terutama menggunakan teknik NDT, seperti teknik analisis gelombang seismik permukaan, yang dioperasikan tanpa perlu merusak struktur perkerasan jalan yang telah terpasang. Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan kinerja pengukuran modulus elastisitas lapisan tanah dasar perkerasan jalan yang diperoleh dari pengukuran metode analisis spektrum gelombang permukaan terpadu (ISASW). Seterusnya hasil modulus dari pengukuran ISASW tersebut diverifikasi menggunakan nilai modulus elastisitas dari hasil pengujian *falling weight deflectometer* (FWD). Pengujian ISASW dan FWD dilakukan di ruas Jalan Cipatik, Subang Jawa Barat. Pengujian daya dukung tanah (*California bearing ratio*, CBR) juga dilakukan pada beberapa titik hasil tes pit pada ruas jalan tersebut.

METODE PENELITIAN

Metode Analisis Spektrum Gelombang Permukaan Terpadu (ISASW)

1. Sistem Konfigurasi Pengukuran di Lapangan

Dalam teknik ISASW ini, sumber mekanik telah digunakan untuk menghasilkan energi gelombang permukaan. Dalam penelitian ini digunakan jenis sumber pukulan mekanik seperti satu set bola baja (dengan berat 5 hingga 20 g), dan beberapa palu yang berukuran sedang (1 kg) ke besar (5 kg). Dua

sensor akselerometer piezoelektrik simetri tunggal DJB model A/123/E dengan rentang reaksi frekuensi $\pm 5\%$ pada 1.2 hingga 20 kHz (Gambar 1) telah dipilih untuk merekam perambatan gelombang di permukaan perkerasan jalan. Konfigurasi pengukuran yang digunakan adalah geometrik sensor-sumber (*common source-receiver*, CSR). Data gelombang yang didapatkan dari sensor seterusnya ditransfer dalam satu perangkat akuisisi ADC (*analog-digital-converter*). Unit akuisisi tersebut adalah ADC Harmonie 01dB berspesifikasi IEC 651-804 tipe 1. berukuran 110 x 35 x 220 mm dengan berat 700 grams. Data ini seterusnya ditransfer kepada sistem analisis selanjutnya yaitu analisis respon frekuensi dan spektrum gelombang. Peralatan yang digunakan dalam teknik ini diberikan berikut ini.

2. Prosedur Pengambilan Data

Menentukan satu set jarak sensor (d) yang terdiri secara tetap untuk bi- sensor pengukuran dan pengukuran jarak dari letak sumber gelombang dengan sensor terdekat (D). Dalam penelitian ini, jarak antara sensor (d) yang digunakan adalah 5, 15, 30, 60 dan 100 cm. Jarak sumber gelombang dan sensor terdekat (D) diatur sama dengan jarak antara sensor (d).

Beberapa set berat dan bentuk sumber gelombang (bola baja dan palu) digunakan bagi memperoleh isyarat yang baik. Bola baja dengan berat 5 hingga 20 g digunakan untuk mendapatkan frekuensi tinggi gelombang permukaan dan palu dengan berat 1 hingga 5 kg digunakan untuk membangkitkan gelombang dengan frekuensi yang lebih rendah.



GAMBAR 1. Sensor akselerometer yang digunakan pada penelitian ini

Sensor diletakkan pada jarak yang sama dalam satu garis lurus di atas permukaan lapisan perkerasan yang telah diukur mengikut konfigurasi jarak tetap. Sensor juga harus terlekat secara baik agar dapat mendeteksi pergerakan gelombang dengan jelas dan tidak terdapat gangguan pada perpindahan fase akibat reaksi yang berbeda dari sensor.

Perekaman gelombang dilakukan secara berulang kali untuk memperoleh sinyal rata-rata dengan tujuan untuk menghilangkan pengaruh gangguan acak (*random noise*) dan sinyal yang tidak jelas pada proses perekaman data (Karl, 1989).

Menghitung kecepatan fase secara kasar menggunakan beberapa nilai frekuensi daripada spektrum fase yang diukur oleh penganalisis spektrum di lapangan. Untuk mendapatkan hasil resolusi yang baik bagi kurva penyebaran lapangan di perkerasan jalan, jumlah siklus dari spektrum fase tertutup (*unwrapping*) semakin bertambah searah dengan penambahan jarak antar sensor. Untuk pengukuran menggunakan dua sensor digunakan konfigurasi lapangan/pengukuran seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.

3. Sistem Pembangunan Kurva Dispersi Eksperimen

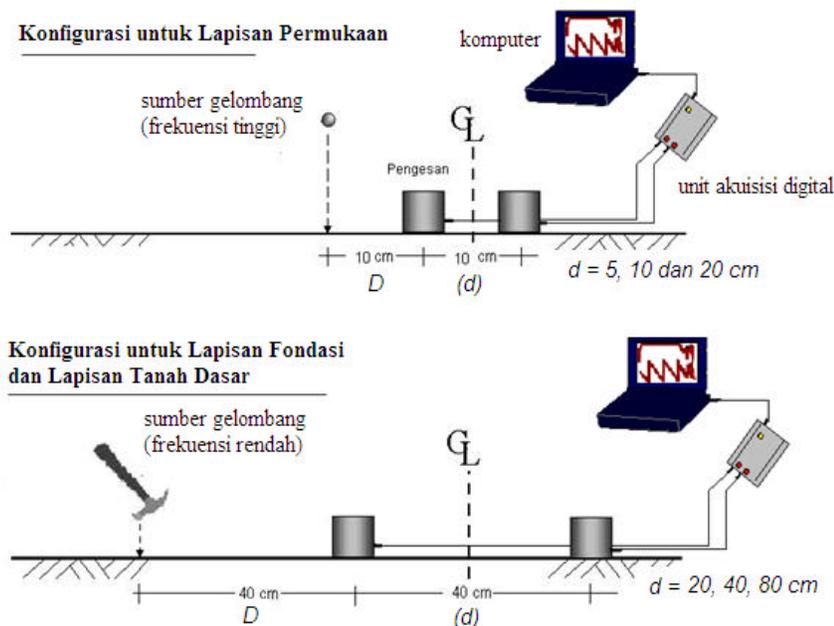
Pembangunan kurva dispersi, dimulai dengan analisis spektrum, proses masking, penyaringan gelombang gangguan dan model penyederhanaan kurva dispersi selanjutnya dilakukan simulasi untuk mendapatkan model yang sesuai. Waktu pergerakan gelombang (t) dapat dihitung menggunakan nilai beda fase (f) dari spektrum gelombang fungsi transfer (*transfer function*) melalui proses FFT data seismik gelombang (Rosyidi et al., 2007). Persamaan dasar metode ini dijelaskan sebagai berikut:

$$f = 2\pi f_0 t \quad (1)$$

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

$$V_{PH} = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (3)$$

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



GAMBAR 2. Prosedur pengukuran ISASW dengan dua sensor

Model transformasi wavelet, *continuous wavelet transform* (CWT), telah digunakan dalam teknik penyaringan respon impuls (*impulse response filtering*, IRF dari Joh, 1996) untuk menyaring sinyal impuls yang diidentifikasi sebagai sinyal gangguan Model ini digunakan menghitung menyaring gelombang seismik dari gangguan gelombang yang selalu muncul dalam pengukuran akibat gangguan lingkungan dan interferensi gelombang tubuh. Teknik ini telah menjadi perangkat yang baik untuk menganalisis lokalisasi variasi amplitudo gelombang dalam domain waktu untuk data tidak stationer. Model wavelet didefinisikan sebagai fungsi $y(t) \in L^2(\mathfrak{R})$ dengan rata-rata nol yang dapat melokalisasi kejadian amplitudo gelombang seismik dalam domain waktu dan frekuensi. Persamaan dasar model ini dituliskan dalam (Rosyidi et al, 2008b):

$$y_{s,t}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} y\left(\frac{t-t}{s}\right) \quad (4)$$

dengan σ adalah parameter dilatasi dan τ parameter translasi ($s, t \in \mathfrak{R}$ and $\sigma \neq 0$) CWT didefinisikan sebagai inner produk dengan keluarga wavelet sebagai $\psi_{\sigma, \tau}(t)$:

$$F_w(s, t) = \left\langle f(t), y_{s,t}(t) \right\rangle \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{y}\left(\frac{t-t}{s}\right) dt \quad (5)$$

dengan \bar{y} adalah kompleks konjugat y and $F_w(s, t)$ adalah peta skala waktu.

4. Analisis Inversi

Tahapan akhir dalam analisis spektrum gelombang permukaan adalah proses inversi. Dalam proses ini, suatu profil asumsi perkerasan jalan yang berisi informasi berupa parameter kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity*, V_s), rasio Poisson, berat volume bahan, faktor peredaman dan ketebalan (H) setiap lapisan perkerasan jalan perlu diasumsikan untuk membangun model kurva dispersi teori melalui perhitungan balik (*backcalculation*). Kelima parameter ini disebut sebagai model parameter permulaan (*starting model parameter*, SMP). Melalui kurva dispersif teori dibangun ini seterusnya dilakukan penyesuaian (*matching*) terhadap kurva dispersi eksperimen yang diperoleh dari tahapan sebelumnya. Proses penyesuaian ini

dilakukan untuk secara terus menerus sampai mendapatkan nilai konvergensi dimana diperoleh suatu penyesuaian terbaik (*best-fitting*) antara kurva teori terhadap kurva eksperimen. Jika kurva teori belum sesuai, maka parameter asumsi V_s dan H perlu diubah untuk menghasilkan profil lainnya yang lebih tepat. Untuk mempermudah proses perhitungan ulang ini atau iterasi dalam penelitian ini, teknik optimasi kemiripan maksimum telah digunakan.

Persamaan (6) di bawah ini merupakan persamaan dasar untuk analisis 3 D matrik kekakuan bahan (Kausel & Peek, 1982; Röesset et al., 1991; Rosyidi, 2007) dalam bentuk diskritnya.

$$w_{so}(r) = -\frac{ipqR}{2} \sum_{l=1}^{2N} \frac{(j_z^l)^2 J_1(k_l R_1) H_0^{(2)}(k_l r)}{k_l} \quad (6)$$

dengan, $w_{B_{s,ob}}$ = perpindahan partikel gelombang secara vertikal, q = vektor beban, R = radius beban, J_{nB} = fungsi Bessel, H_{nB} = fungsi Hankel, k = nomor gelombang dan r = domain ruang. Selanjutnya, proses optimasi dilakukan guna mendapatkan kesesuaian/kesamaan yang terbaik antara kurva teori dan eksperimen. Kesesuaian ini dinilai dari kesalahan kesamaan terkecil yang biasanya diukur melalui nilai RMS (*root mean square*). Semakin kecil nilai perbedaan kurva teori dan eksperimen ini, maka profil kecepatan geser perkerasan jalan akan semakin mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Dalam studi ini, perangkat lunak WinSASW versi 3.1 digunakan untuk melakukan operasi inversi.

Proses iterasi dalam analisis inversi diperlukan perhitungan optimasi sehingga penyesuaian kurva disperse teori terhadap kurva eksperimen dapat berjalan secara otomatis. Matrik sensitifitas (G) dan matrik kovarian (C) telah digunakan dalam studi ini untuk menghitung perubahan parameter model (m) asumsi dari profil asumsi supaya diperoleh profil hasil inversi yang memiliki RMS yang paling kecil dalam proses optimasi. Parameter model (m_{j+1}) kalibrasi dari profil informasi awal dihitung menggunakan metode kemiripan maksimum. Dalam proses iterasi seterusnya, penyesuaian model ($m_j = m_{j+1} + m$) dijalankan untuk mendapatkan parameter model yang hampir sama dengan profil sebenarnya. Persamaan umum matrik kepekaan dan kovarian yang digunakan dalam penelitian ini dituliskan

sebagai hubungan (Menke, 1984; Joh, 1996; Rosyidi, 2004):

$$m_{n+1} = m_n - (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} \times \\ (G^T C_D^{-1} ? d + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (7)$$

$$? m = (G^T C_D^{-1} G + C_M^{-1})^{-1} (G^T C_D^{-1} ? d \\ + C_M^{-1} (m_n - m_{prior})) \quad (8)$$

disini, $? m$ merupakan penyesuaian parameter model dan $? d$ adalah kesalahan kesamaan/perpadanan (*mismatched*) dari data kurva dispersi eksperimen terhadap teori.

5. Perhitungan Modulus Elastisitas

Selanjutnya, profil modulus elastisitas bahan perkerasan (E) dapat dihitung menggunakan nilai kecepatan gelombang geser (V_s), kepadatan bahan (ρ) dan rasio Poisson (ν) bahan berdasarkan teori elastik (Yoder & Witczak, 1975) dengan persamaan :

$$E = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (9)$$

Metode Falling Weight Deflectometer

Pengujian pembandingan lapangan *falling weight deflectometer* (FWD) dan tes pit telah dilakukan pada titik yang sama dimana pengujian ISASW telah dilakukan. Pengujian FWD dijalankan dengan memberikan beban impuls yang dijatuhkan di atas perkerasan jalan dan seterusnya sejumlah sensor geofon digunakan untuk merekam respon lendutan yang dihasilkan akibat beban tersebut. Beban tersebut diasumsikan sebagai beban kendaraan sehingga lendutan yang dihasilkan merupakan respon perkerasan jalan terhadap beban kendaraan. Penjelasan mengenai pengujian FWD dan metode analisis perhitungan baliknya diberikan sebagai berikut.

1. Peralatan dalam FWD

i. Pelat Beban

Pembebanan dilakukan menggunakan sistem hidrolik dalam perangkat mekanik FWD.

Besarnya beban yang digunakan selama proses pengujian berkisar 580 kPa dengan rentang waktu selama pembebanan pada permukaan jalan antara 25 – 30 msec. Beban dijatuhkan di atas pelat beban (Gambar 3) dengan ukuran diameter 300 mm. Pelat ini diletakkan tepat di titik yang diuji.

ii. Sensor

Sensor atau geofon (Gambar 3) dengan frekuensi natural sebesar 4.7 Hz pada alat FWD, berguna untuk mengukur besarnya lendutan yang terjadi pada permukaan perkerasan jalan sebagai akibat dari beban yang diberikan. Geofon ini diletakkan pada jarak yang berbeda yaitu 0, 200, 300, 450, 600, 900, dan 1500 mm dari pusat pelat beban yang digunakan.

iii. Komputer

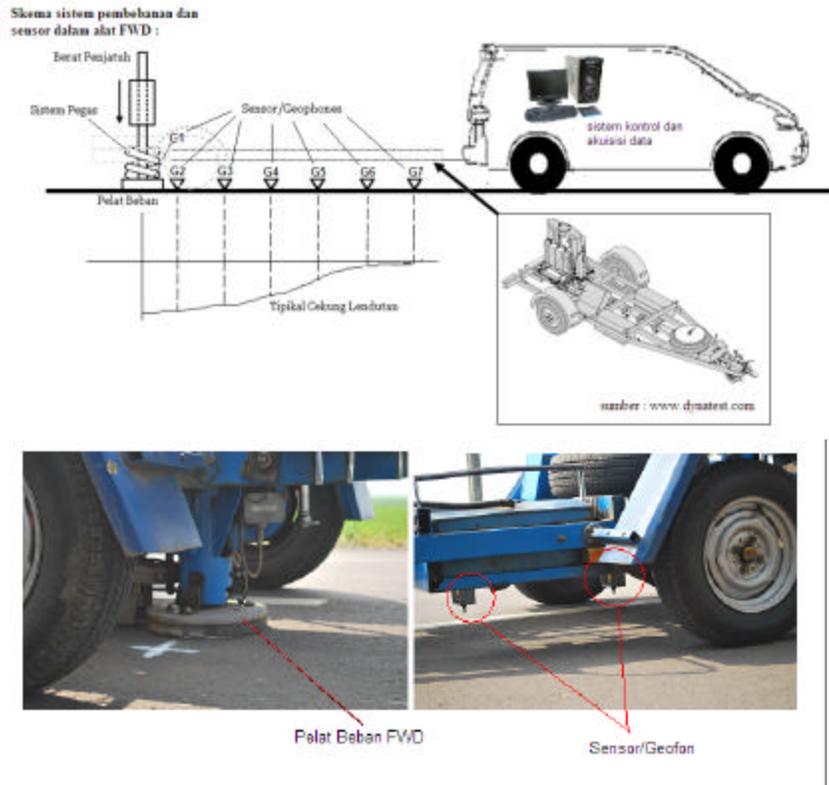
Satu set komputer digunakan untuk sistem kontrol terhadap mekanisme peralatan FWD dan proses akuisisi data lendutan. Peralatan komputer ini diletakkan pada kendaraan yang membawa set mekanik FWD.

iv. Alat pengukur suhu perkerasan jalan

Dalam analisis perhitungan balik lendutan, suhu lapisan permukaan jalan digunakan sebagai parameter koreksi dalam perhitungan. Oleh karena itu, pengukuran suhu perkerasan lapangan menggunakan alat pengukur suhu lapangan dijalankan selama pengukuran FWD.

2. Mekanisme Kerja FWD

Pada prinsipnya, alat FWD memberikan beban impuls terhadap struktur perkerasan khususnya perkerasan lentur melalui pelat beban berbentuk sirkular (bundar) yang dimodelkan dapat memberikan efek yang sama seperti beban roda kendaraan (Darsana et al., 1994). Pelat sirkular diletakkan di atas permukaan perkerasan yang diukur. Kemudian beban dijatuhkan di atas pelat sehingga menyebabkan beban impuls yang akan memberikan respon defleksi (lendutan) pada struktur perkerasan yang dikenali sebagai suatu cekung defleksi (*deflection bowl*).



GAMBAR 3. Skema sistem control, pembebanan dan sensor dalam FWD dan tipikal cekung lendutan yang diperoleh dari pengukuran

3. Analisis Lendutan Hasil Pengukuran FWD

Berdasarkan data lendutan tersebut, nilai modulus lapisan perkerasan dapat dihasilkan menggunakan konsep perhitungan balik (*backcalculation*). Prinsip perhitungan ini adalah mempersamakan cekung lendutan teoritis dengan hasil survai. Dalam proses perhitungan *backcalculation* diperlukan asumsi awal sebuah struktur perkerasan yang diberikan sebagai struktur dengan dua lapisan (*two layer system*), tiga lapisan (*three layer system*) atau menggunakan empat lapisan (*four layer system*). Dalam penelitian ini, sistem tiga lapisan digunakan dalam proses perhitungan balik. Lendutan teori dapat dihitung dari data komposisi dan tebal lapisan perkerasan (modulus elastisitas dan rasio Poisson), pengaruh lingkungan dan konfigurasi beban roda. Selain itu, faktor lingkungan juga diperhitungkan dalam analisis ini, diantaranya suhu perkerasan khususnya untuk perhitungan modulus lapisan perkerasan dan jumlah musim per tahun dalam kaitannya dengan perhitungan modulus elastisitas tanah (*subgrade*). Dalam penelitian ini perangkat lunak BAKFAA

digunakan untuk menganalisis data lendutan dari pengukuran FWD di perkerasan jalan.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dipilih pada tiga ruas jalan, yaitu: ruas Jalan Cipatik-Soreang 1 (jejak roda dalam) : KM 31+500 s/d KM 31+000, ruas Jalan Cipatik-Soreang 2 (jejak roda luar) : KM 31+500 s/d KM 31+000, dan ruas Jalan Cagak Subang (jejak roda luar) : KM 169+200 s/d KM 170+000.

Untuk lokasi Jalan Cipatik Soreang pada STA 31+300 (Gambar 13) terdiri atas lapisan ACWC setebal 6.5 cm, lapis penetrasi (Lapen) setebal 7 cm, lapis pondasi atas setebal 20 cm, timbunan setebal 8 cm, dan tanah dasar. Dari Gambar 14 terlihat bahwa untuk Jalan Cagak Subang STA 170+000, komposisi perkerasan pada lokasi ini terdiri atas lapisan ACWC setebal 9 cm, lapisan base yang terdiri atas lapisan Sirtu setebal 17 cm dan tanah dasar. Untuk lokasi KM 169+560 ACWC diketahui setebal 15 cm dan lapisan granular 27 cm serta tanah dasar, sedangkan untuk lokasi KM 169+260 lapisan perkerasan jalan terdiri dari

lapisan ACWC 6 cm, ACBC 6 cm, Lapen 5 cm, Sirtu 10 cm serta tanah dasar.

Pada titik yang sama dengan tes pit, dilakukan pengukuran daya dukung tanah dasar perkerasan jalan dengan alat *dynamic cone penetrometer* (DCP) untuk menghasilkan nilai CBR lapangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Modulus Elastisitas Menggunakan Teknik ISASW

1. *Pembangunan Kurva Dispersi Eksperimen*

Data seismik didapatkan dari beberapa kali perekaman perambatan gelombang yang dihasilkan oleh sumber gelombang mekanik di atas lapisan permukaan perkerasan (Gambar 4). Sumber gelombang perlu divariasikan supaya diperoleh frekuensi perambatan gelombang permukaan yang sesuai terhadap jarak antara sensor dan lapisan yang diinvestigasi. Jika rekaman data menunjukkan interferensi oleh sinyal gangguan (misalnya pantulan gelombang tubuh dan sinyal dari lingkungan), maka isyarat seismik perlu dilokalisasi dan dipisahkan dari sinyal gangguan. Gambar 4 juga menunjukkan contoh hasil spektrum fasa gelombang dari pengukuran seismik di Jalan Cagak, Subang, untuk konfigurasi jarak sensor 60 cm. Spektrum fasa yang ditunjukkan merupakan spektrum tertutup (*wrapped phase spectrum*) yang dihasilkan dari perbaikan spektrum melalui proses penyaringan/filtering menggunakan teknik CWTF (*continuous wavelet transform filtering*) dengan persamaan matematik dasar ditunjukkan dalam persamaan (4) dan (5) yang direkomendasikan oleh Rosyidi et al. (2009). Spektrum asli dari pengukuran menunjukkan beberapa segmen corak spektrum yang kurang jelas karena adanya sinyal gangguan, sehingga teknik CWTF telah digunakan untuk memperbaiki spektrum fasa dari data respon impuls yang diperoleh dari inversi integral spektrum fasa tersebut. Diskusi mengenai teknik ini dapat diperoleh dari Rosyidi (2009) dan Rosyidi et al. (2009).

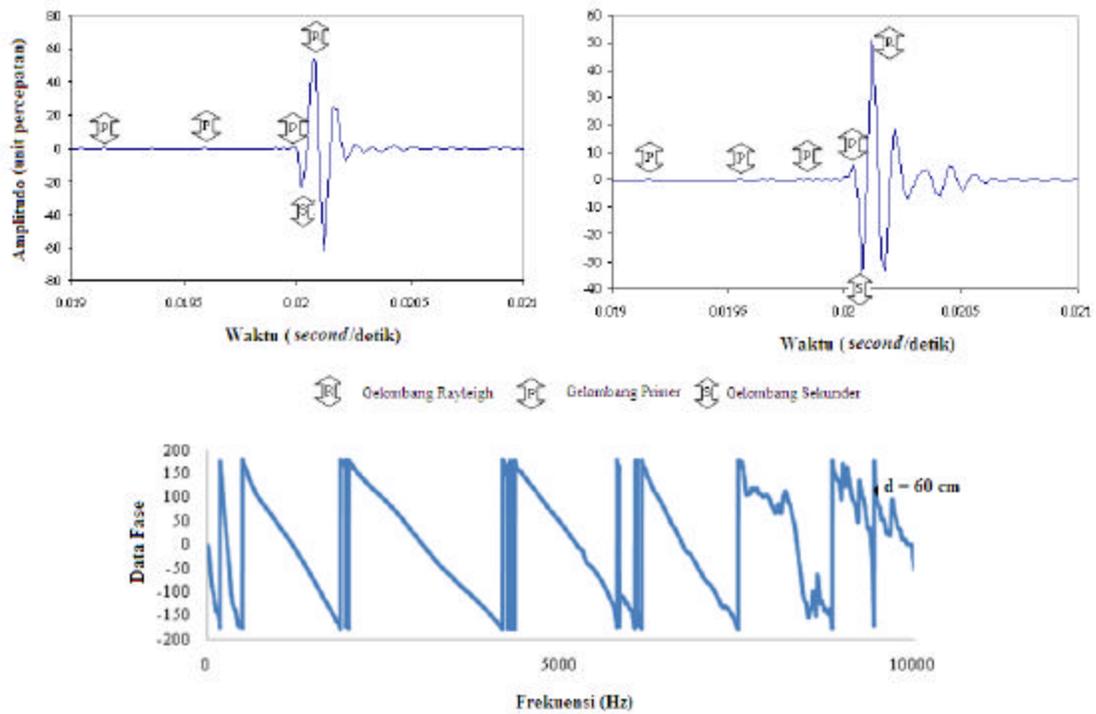
Dari nilai beda fase gelombang dalam spektrum fasa, seterusnya kurva dispersif eksperimen (kecepatan fase gelombang vs frekuensi) dapat dihasilkan menggunakan

persamaan 1 sampai dengan 3. Hasil plot kecepatan fase dari setiap frekuensi gelombang yang diamati diberikan dalam Gambar 5. Berdasarkan gambar ini, lapisan permukaan aspal dapat dideteksi dengan baik pada frekuensi tinggi (> 10 kHz) dengan kecepatan fase sekitar 800 hingga 1000 m/s. Untuk lapisan fondasi dapat dideteksi pada frekuensi yang lebih rendah (600 Hz hingga 3 kHz) untuk wilayah kecepatan fase antara 400 hingga 650 m/s dan lapisan tanah dasar didapatkan pada frekuensi lebih rendah dari 200 Hz dengan kecepatan fase antara 100 hingga 250 m/s. Dari hasil ini dapat ditunjukkan bahwa lapisan perkerasan dengan kekakuan lebih tinggi akan dideteksi dengan baik pada frekuensi gelombang yang lebih tinggi karena menghasilkan kecepatan fase yang lebih tinggi dan demikian juga sebaliknya.

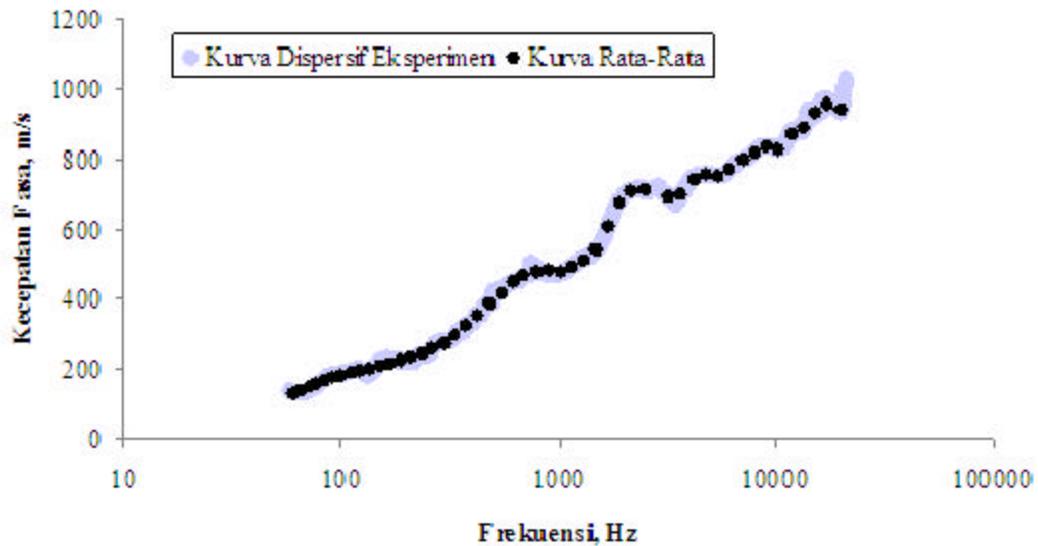
Untuk menjalankan proses inversi profil 1-D kecepatan gelombang geser, jumlah data kecepatan fase dari kurva dispersif eksperimen diringkas dan dirata-ratakan menjadi 50 titik data. Jumlah data yang lebih sedikit ini menjadikan proses analisis inversi berjalan lebih efektif dan cepat. Hasil kurva dispersif rata-rata diberikan dalam Gambar 5.

2. *Hasil Analisis Inversi*

Analisis inversi dilakukan untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser dengan kedalaman dari data kurva dispersif eksperimen rata-rata. Proses inversi dimulai dengan mengasumsikan parameter model dalam profil awal (*starting model parameter; SMP*) seperti dalam Tabel 1. Seterusnya kurva dispersi teori dibangun menggunakan model matrik kekakuan dinamik 3D (Persamaan 6). Terdapat lima parameter bahan yang perlu diasumsikan terlebih dahulu, yaitu kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity, V_s*), ketebalan lapisan, rasio Poisson, kepadatan bahan (*density*) dan faktor peredaman (*damping factor*). Meskipun demikian, hanya parameter kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan saja yang memiliki pengaruh dominan dalam pembangunan kurva teori. Gambar 6 menunjukkan contoh profil SMP (Tabel 1) yang digunakan untuk mendapatkan kurva dispersif teori dalam proses inversi.



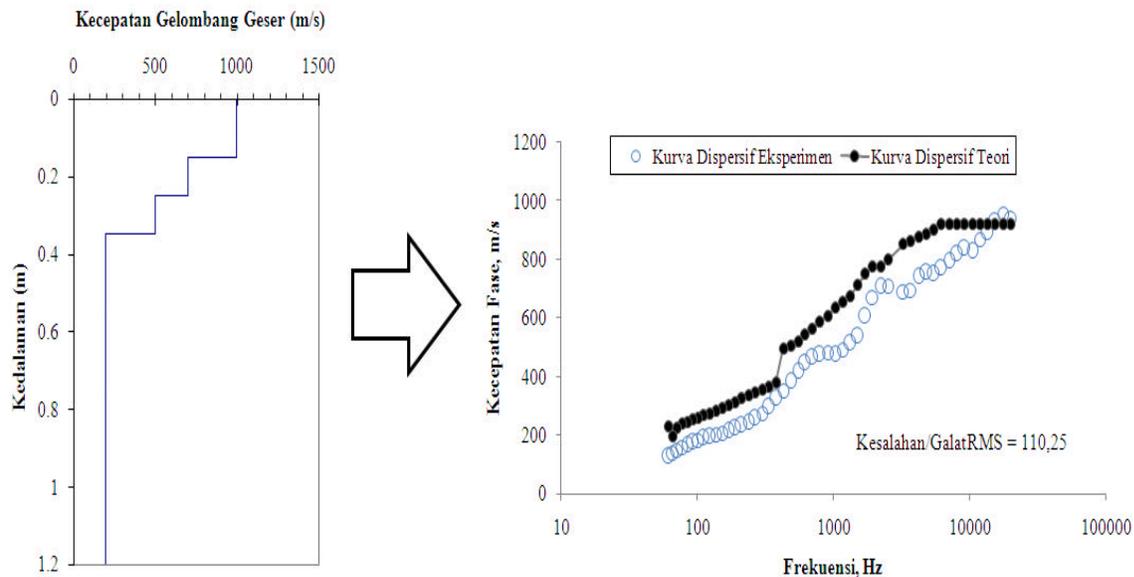
GAMBAR 4. Pola rekaman data seismik dan spektrum fase tertutup untuk pengukuran jarak sensor 60 cm di Jalan Cagak Subang



GAMBAR 5. Salah satu kurva dispersif eksperimen rata-rata dari spektrum fase terbuka untuk pengukuran di Jalan Cagak, Subang

TABEL 1. Parameter asumsi dalam profil SMP

No. Lapisan	Tebal	V_s	g	n	D
1	0,05	1000	2100	0,25	0,02
2	0,05	1000	2100	0,25	0,02
3	0,05	1000	2100	0,25	0,02
4	0,1	700	1800	0,33	0,02
5	0,1	500	1800	0,33	0,02
6	0,2	200	1800	0,33	0,02
7	0,2	200	1700	0,33	0,02
8	0,5	200	1700	0,33	0,02
9	100	200	1700	0,33	0,02

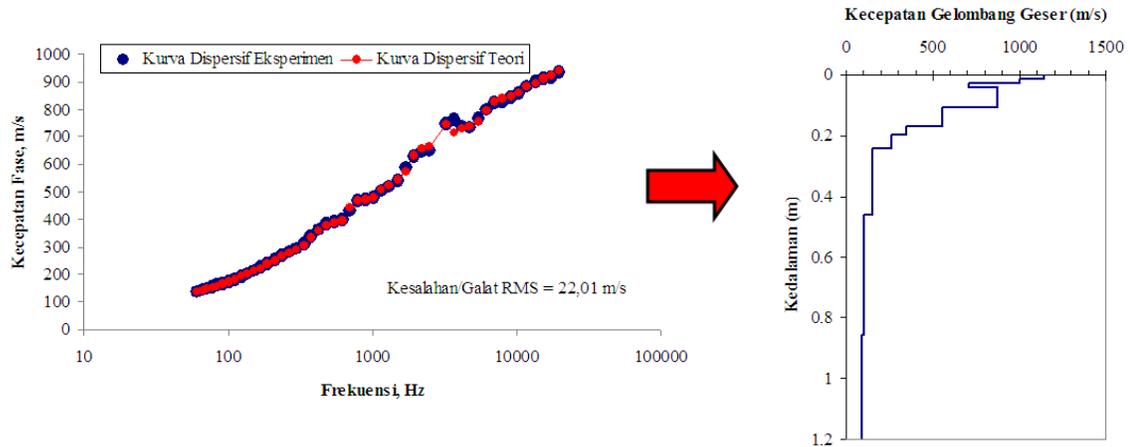


GAMBAR 6. Profil SMP dan penyesuaian kurva dispersif teori terhadap eksperimen

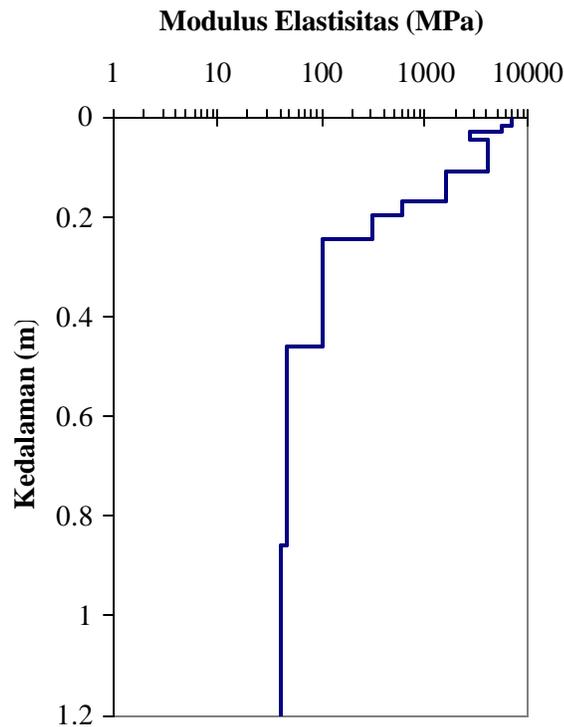
Proses iterasi dalam analisis inversi seterusnya dilakukan dengan menyesuaikan kurva teori terhadap eksperimen menggunakan persamaan (7) dan (8). Proses iterasi dihentikan jika telah terjadi konvergensi antara kurva teori terhadap eksperimen dengan menghasilkan kesalahan yang minimal. Profil SMP dengan kesalahan minimal yang digunakan sebagai profil terbaik untuk mewakili kondisi perkerasan jalan. Gambar 7 menunjukkan contoh analisis penyesuaian kurva teori kepada kurva eksperimen proses inversi sehingga diperoleh konvergensi dengan nilai kesalahan RMS = 21,01 m/s dan profil akhir kecepatan gelombang geser dari hasil inversi.

3. Analisis Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas bahan setiap lapisan perkerasan jalan dihitung menggunakan hubungan antara kecepatan gelombang geser, rasio Poisson dan kepadatan bahan seperti telah dituliskan dalam persamaan (9). Parameter rasio Poisson dapat diasumsikan dan nilai kepadatan bahan didapatkan dari data sekunder atau basis data jenis perkerasan. Gambar 8 menunjukkan profil modulus elastisitas dari profil kecepatan gelombang geser (Gambar 7) pada salah satu STA di Jalan Cagak, Subang .



GAMBAR 7. Perpadanan kurva teori terhadap eksperimen dan profil akhir VS



GAMBAR 8. Profil modulus elastisitas perkerasan jalan

Perubahan modulus elastisitas terlihat secara jelas dalam profil yang menunjukkan perbedaan kekakuan lapisan bahan penyusun perkerasan jalan. Rata-rata pemberat (*weighted average*) menunjukkan bahwa lapisan permukaan ACWC memiliki nilai modulus 2660 MPa, lapisan fondasi memiliki modulus rata-rata antara 440 MPa dan bahan lapisan

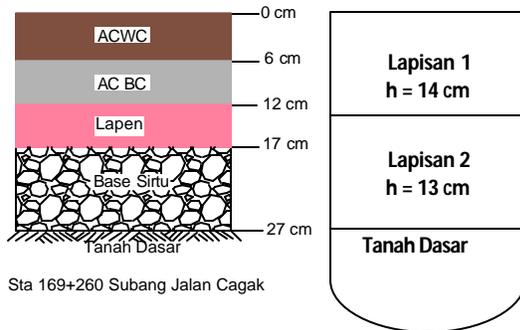
fondasi bawah berada pada modulus rata-rata 103 MPa. Lapisan tanah dasar dideteksi pada nilai modulus rata-rata 40 MPa. Beberapa hal yang perlu diperhatikan di sini adalah nilai regangan dalam modulus elastisitas. Prinsip kerja teknik ISASW adalah menggunakan analisis perambatan gelombang. Perambatan energi gelombang akan menghasilkan nilai

tegangan pada regangan yang kurang dari 1×10^{-4} % sehingga sifat material yang diukur adalah nilai modulus yang maksimum (Rosyidi et al., 2008a). Persamaan respon tegangan dan regangan yang digunakan adalah model konstitutif bahan elastik linier.

Analisis Modulus Elastisitas Menggunakan FWD

4. Pemodelan Struktur Perkerasan

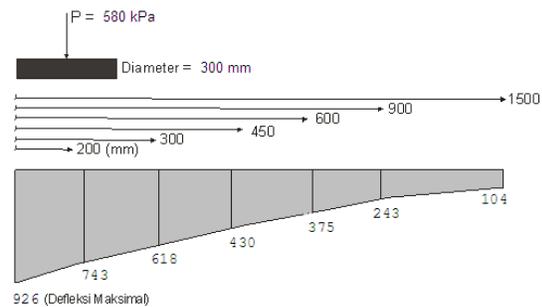
Dalam penelitian ini, struktur perkerasan dimodelkan sebagai sistem struktur 3 lapisan (Gambar 9). Lapisan perkerasan dapat digabungkan dengan syarat kesamaan karakteristik (Yoder & Witczak, 1975). Untuk pemodelan sistem struktur berlapis, ketebalan lapisan terbawah selalu diasumsikan dengan nilai tak terhingga.



GAMBAR 9. Contoh pemodelan 3 lapisan dari hasil tes pit di Jalan Cagak, Subang

5. Data Lendutan FWD

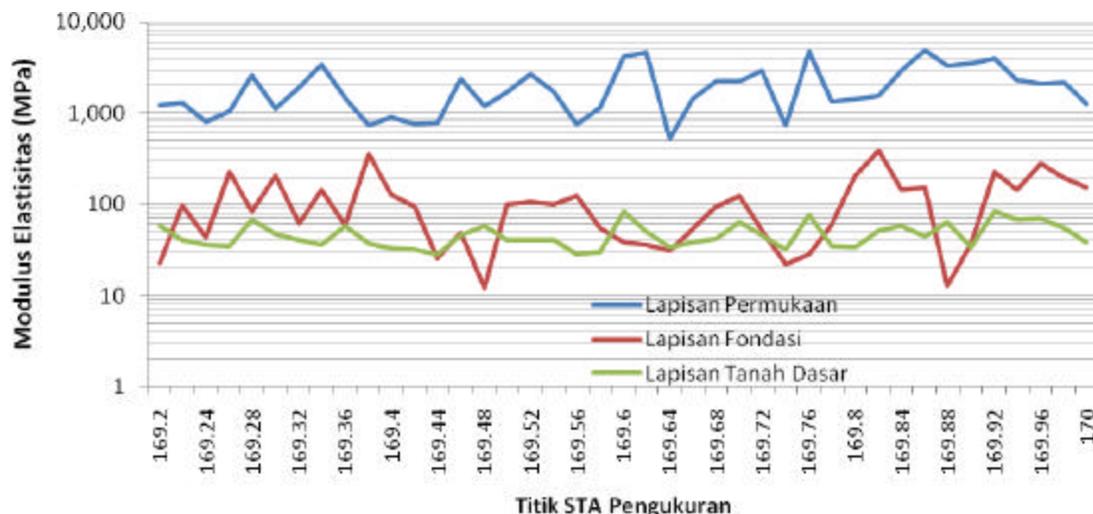
Contoh data lendutan yang dianalisis didapatkan dari pengujian FWD diperlihatkan pada Gambar 10. Data lendutan ini diukur dari titik bacaan ditetapkan pada jarak 0, 200, 300, 450, 600, 900 dan 1500 mm dari pusat beban dengan beban yang bekerja adalah sekitar 580 kPa dengan diameter pelat pembebanan sebesar 30 cm. Kombinasi dari pembebanan dan diameter pelat pembebanan akan memberikan total beban sebesar 4.1 ton yang setara dengan besarnya beban standar dalam perencanaan sistem perkerasan.



GAMBAR 10. Contoh data lendutan perkerasan jalan

6. Hasil Analisis Modulus Elastisitas

Perhitungan balik untuk data lendutan FWD dilakukan pada seluruh lokasi penelitian. Gambar 11 menunjukkan contoh modulus elastisitas untuk masing-masing lapisan perkerasan jalan dari hasil perhitungan balik untuk Jalan Cagak-Subang.



GAMBAR 11. Hasil pengukuran modulus elastisitas pada Jalan Cagak-Subang

Secara teorinya, nilai modulus elastisitas yang diperoleh dari proses perhitungan balik menunjukkan nilai yang memuaskan karena nilai RMS yang dihasilkan adalah cukup kecil yaitu berada dalam wilayah 0,14 – 1,66 mils dengan rata-rata RMS 0,58 mils.

Untuk nilai modulus elastisitas yang didapat terlihat jatuh pada 1500 MPa – 3500 MPa, walaupun ada juga beberapa nilai yang terlihat lebih kecil dari 1000 MPa. Ini dimungkinkan telah terjadi kerusakan yang berupa retak ataupun *bleeding* pada lokasi dimana dilakukan uji lendutan. Besaran nilai modulus elastisitas dari bahan granular juga memberikan hasil yang cukup logis pada ruas Jalan Cagak Subang, walaupun ada beberapa nilai yang terlihat terlalu rendah. Untuk Jalan Cipatik Soreang, malahan kebalikannya, dimana ada beberapa titik yang memberikan nilai modulus elastisitas lapisan granular yang terlalu tinggi.

Untuk modulus elastisitas tanah dasar memberikan hasil yang cukup baik. Hasil perhitungan balik memberikan nilai modulus elastisitas tanah dasar dalam rentang 50 MPa – 120 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CBR tanah dasar pada lokasi-lokasi ini diketahui pada interval 5 – 12 %. Nilai ini merupakan nilai kekuatan tanah dasar yang umumnya ditemui di Indonesia.

Verifikasi Modulus Elastisitas Lapisan Tanah Dasar Hasil Pengukuran ISASW Menggunakan Hasil FWD

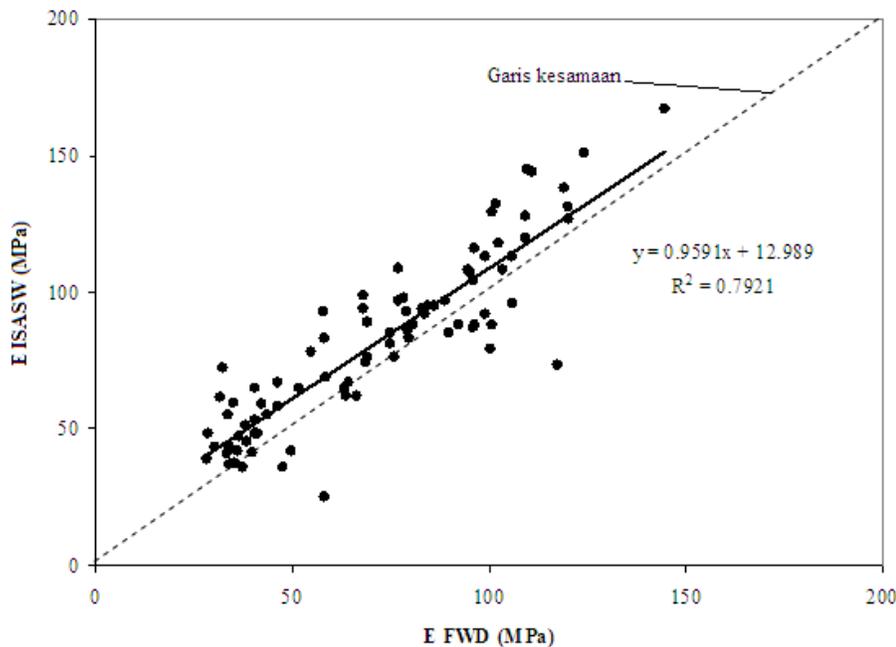
Dalam penelitian ini, pengukuran ISASW dan FWD dilakukan pada titik yang sama. Dengan demikian, hasil modulus elastisitas lapisan tanah dasar perkerasan jalan yang diperoleh dari pengukuran ISASW dapat diverifikasi dengan hasil modulus elastisitas dari pengukuran FWD. Proses verifikasi ini dilakukan untuk mendapatkan rasionalisasi hasil pengukuran seismik dan korelasi empirik ISASW terhadap hasil FWD. Pemilihan lapisan tanah dasar untuk proses verifikasi ini karena tanah dasar memegang peranan penting dalam disain perkerasan jalan dan perhitungan SN, khususnya jika melibatkan metode analitik-mekanistik.

Gambar 12 menjelaskan hubungan modulus elastisitas dari ISASW dan FWD untuk lapisan tanah dasar yang didapatkan dari 83 titik observasi pada dua lokasi penelitian. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa trend garis regresi linier hubungan antara ISASW dan FWD mendekati garis kesamaan atau *equality line*. Dengan koefisien determinasi sebesar 0,79, sehingga dapat disimpulkan bahwa hubungan antara modulus elastisitas hasil ISASW dan FWD adalah berkorelasi kuat.

Meskipun pengujian seismik bekerja pada level regangan bahan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan respon regangan oleh beban jatuh dalam pengujian FWD. Nilai modulus elastisitas yang dihasilkan dari pengukuran ISASW menunjukkan nilai sedikit lebih tinggi atau relatif sama dibandingkan dengan nilai modulus hasil pengukuran FWD. Keadaan ini disebabkan oleh tanah dasar memperoleh pengaruh regangan yang relatif hampir sama baik dari beban impuls (FWD) maupun perambatan gelombang permukaan (ISASW).

Berdasarkan teori tegangan-regangan (Boussinesq), beban impuls yang dijatuhkan di permukaan jalan akan didistribusikan kepada lapisan yang berada di bawahnya dalam tegangan dengan luasan yang lebih besar. Sehingga, tegangan vertikal dan horizontal yang diterima oleh lapisan tanah dasar akan lebih kecil dibandingkan dengan lapisan permukaan dan fondasi. Dimungkinkan, tegangan yang kecil pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan menghasilkan respon regangan yang nilainya hampir sama atau mendekati regangan akibat perambatan gelombang dalam teknik ISASW. Jika regangan dalam nilai yang relatif sama maka dimungkinkan modulus elastisitas yang dihasilkan menjadi sama.

Untuk mengesahkan hipotesis ini, kajian lanjut pemodelan FWD yang terkait dengan pengaruh distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan jalan terhadap nilai modulus elastisitasnya perlu dilakukan. Pendekatan numeric-analistik seperti elemen hingga, persamaan differensial hingga dan penyelesaian analitik dapat digunakan untuk tujuan tersebut.



GAMBAR 12. Korelasi modulus elastisitas antara ISASW dan FWD untuk lapisan tanah dasar perkerasan jalan

KESIMPULAN

Dalam studi ini, kinerja teknik gelombang permukaan atau ISASW untuk menghasilkan modulus elastisitas lapisan perkerasan jalan, khususnya lapisan tanah dasar dan verifikasi hasilnya dengan pengujian FWD telah disampaikan. Beberapa kesimpulan dapat diambil dari studi ini, yaitu:

1. Teknik ISASW (*integrated spectrum analysis of surface waves*) ditunjukkan mampu menghasilkan profil kecepatan gelombang geser (V_s) pada perkerasan jalan. Berdasarkan parameter tersebut, nilai kekakuan (modulus elastisitas) bahan pada struktur perkerasan jalan dapat ditentukan. Perubahan modulus elastisitas terhadap kedalaman pada perkerasan jalan juga dapat ditunjukkan dengan jelas.
2. Seperti halnya teknik ISASW, analisis modulus elastisitas menggunakan teknik analisis lendutan menggunakan pengujian FWD juga dilakukan dalam studi ini. Menggunakan sistem perkerasan jalan tiga lapisan, teknik FWD ditunjukkan mampu menghasilkan nilai modulus elastisitas perkerasan jalan dengan baik.
3. Nilai modulus yang dihasilkan dari teknik ISASW adalah modulus elastisitas dengan

nilai regangan yang sangat rendah sehingga respon bahan dukur dalam kondisi elastik linier. Meskipun demikian, khusus untuk lapisan tanah dasar, hasil verifikasi menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas dari ISASW terhadap FWD ditunjukkan memiliki nilai yang hampir sama. Hal ini karena tegangan yang kecil pada lapisan tanah dasar perkerasan jalan oleh baban impuls FWD menghasilkan respon regangan yang nilainya hampir sama atau mendekati regangan akibat perambatan gelombang dalam teknik ISASW. Jika regangan dalam nilai yang relatif sama maka dimungkinkan modulus elastisitas yang dihasilkan menjadi sama.

4. Analisis regresi linier antara modulus elastisitas yang dihasilkan dari teknik ISASW dan FWD khusus untuk lapisan tanah dasar perkerasan jalan menunjukkan hubungan yang kuat dengan nilai koefisien determinasi yang tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih setinggi-tingginya kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui Hibah Bersaing Tahun

Anggaran 2009 melalui kontrak SP2H No. 058/SP2H/PP/DP2M/IV/2009. Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada asisten peneliti di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan tim peneliti dari Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Banlitbang, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung yang telah banyak membantu selama proses pengambilan data seismik dan FWD di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Darsana, I.K., Syarifudin, D.A., Mintardjo, Kartiwan, W & Nurtohin, S. (1994). Pemanfaatan Falling Weight Deflectometer untuk Program IRMS, Laporan Penelitian 11-009-TJ-93, Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan, Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Departemen Pekerjaan Umum. Tidak dipublikasikan.
- Joh, S.-H. (1996). *Advances in data interpretation technique for Spectral Analysis-of-Surface-Waves (SASW) measurements*. Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin.
- Karl, J.H. (1989). *An introduction to digital signal processing*. London: Academic Press.
- Kausel, E. & Peek, R. (1982). Dynamic loads in the interior of a layered stratum: an explicit solution. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(5), 1459-1481.
- Menke, W. (1984). *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. New York: Academic Press.
- 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
- Röesset, J.M. Chang, D.-W. & Stokoe II, K.H., (1991). Comparison of 2D and 3D models for analysis of surface wave tests. *Proc. of the 5th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 111-126.
- Rosyidi, S.A. (2005). Prospek pengembangan teknologi analisis gelombang seismik permukaan untuk evaluasi jalan pasca konstruksi di Indonesia. *Prosiding Konferensi Regional Teknik Jalan ke-8 (KRTJ-8)* Wilayah Barat, Batam.
- Rosyidi, S.A. (2004). *Evaluation of the dynamic stiffness of pavement layer using SASW method*. Master of Science Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A. (2007). Comparison between 2-D and 3-D stiffness matrix model simulation of SASW inversion for pavement structure *Civil Engineering Dimension*, 9(1), 42 – 48.
- Rosyidi, S.A. (2009). *Wavelet analysis of surface wave for evaluation of soil dynamic properties*. Ph.D. Thesis, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M., Taha, M.R. & Mustafa, M.M. (2002). The measurement of the dynamic properties of flexible pavement using Spectral-Analysis-of-Surface-Wave (SASW) Method. *Prosiding Simposium V FSTPT*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. (2003a). Determination the design input parameter of dynamic elastic modulus of road-pavement base layer using wave propagation technique. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7 (KNTJ-7)*, Jakarta.
- Rosyidi, S.A., Hantoro, G. & Taha, M.R. (2003b). The use of shear wave velocity for predicting the stiffness of asphalt layer of pavement profile. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7 (KNTJ-7)*, Jakarta.
- Rosyidi, S.A. & Taha, M.R. (2004a). Measurement of pavement moduli using simple surface wave propagation technique. *Prosiding Simposium VII FSTPT*, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M. & Taha, M.R., (2004b). Measurement of subgrade stiffness using the SASW method. *Proceeding of Malaysian Geotechnical Conference*, The Institute of Engineer Malaysia, Kuala Lumpur.
- Rosyidi, S.A. & Ikhsan, M. (2005). Studi Simulasi Model 2 D dan 3 D Gelombang Rayleigh dalam Analisis SASW untuk Evaluasi Nilai Struktural Infrastruktur.

- Laporan Penelitian Kompetisi Dosen, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- 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.
- Rosyidi, S.A., Nayan K.A.M., Taha, M.R. & Ismail, A. (2006). Estimating G-max of soil subgrade using a seismic method, *The International Electronical Journal of Non Destructive Testing*, 11(6), June 2006.
- Rosyidi, S.A., Hantoro, G., Siegfried, Handayani, G. & Taha, M.R. (2007). Pengembangan metode *integrated spectral-analysis-of-surface-waves* (SASW) untuk evaluasi nilai modulus elastisitas struktur perkerasan jalan. Laporan Penelitian Hibah Bersaing Tahun Pertama, Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Tinggi Republik Indonesia.
- Rosyidi, S.A., Siegfried, Hantoro, G. & Taha, M.R. (2008a). Perbandingan hasil pengukuran modulus elastisitas antara teknik sasw dan fwd pada perkerasan jalan. *Prosiding Simposium FSTPT XI* Universitas Diponegoro, Semarang.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R., Chik, Z. & Ismail, A. (2008b). Seismic response identification of surface waves on residual soils using wavelets analysis. *Proc. of International Conference in Geotechnical and Highway Engineering*, Geotropika 2008, Kuala Lumpur
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R., Chik, Z. & Ismail, A. (2009). Signal reconstruction of surface waves on SASW measurement using gaussian derivative wavelet transform. *Acta Geophysica*, 57(3), 616-635.
- Yoder, E.J. & Witczak, M.W. (1975). *Principle of pavement design*. New York: John Willey & Sons.

 PENULIS:

Sri Atmaja P. Rosyidi✉

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Bantul 55183, Yogyakarta, Indonesia.

Siegfried

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Banlitbang Pekerjaan Umum, Bandung, Indonesia.

✉Email: atmaja_sri@umy.ac.id

Diskusi untuk makalah ini dibuka hingga tanggal 1 April 2011 dan akan diterbitkan dalam jurnal edisi Mei 2011