

## **NASKAH KULIAH TAMU**

### **PENGGUNAAN METODE ANALISIS GELOMBANG SEISMIK PERMUKAAN (Spectral Analysis of Surface Wave) UNTUK PENGEMBANGAN TEKNIK EVALUASI TANPA RUSAK (NDT) PERKERASAN LENTUR DAN KAKU DI INDONESIA**

**Sri Atmaja P. Rosyidi, ST., M.Sc.Eng, Ph.D., P.Eng.** <sup>1,2,3</sup>

**Disampaikan di Stadium General  
Sekolah Tinggi Teknik Dumai, Provinsi Riau  
Dumai, Sabtu 26 Juni 2010**

---

<sup>1</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil , Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Yogyakarta 55183, Email: atmaja\_sri@umy.ac.id

<sup>2</sup> Postdoctoral Research Associate, Geohazards and geoenvironments Research Group and Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Research Group, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) 43600 Bangi, Selangor Malaysia.

<sup>3</sup> Senior Principal Research Fellow, Center for Regional Energy Management (CREM) Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Energy Conservation in Built Environment.

## ABSTRACT

The need of accurate, cost-effective, fast and non-destructive evaluation of Indonesian pavement system is becoming ever important because the rehabilitation and management of roads is becoming increasingly difficult due to the increasing number of aging roads and limited budgets. An important feature of quality assessment of a pavement management system is the ability to determine the current condition and to predict future condition of the pavement. In order to establish the structural capacity of the existing roads, accurate information of the layer elastic moduli and thicknesses are needed. The aim of this paper is to describe the potential technique of the Spectral Analysis of Surface Wave (SASW) method for assessing the dynamic stiffness of constructed pavements. The SASW is a non-destructive in situ seismic technique which is based on the dispersion phenomena of Rayleigh waves in layered media. A set of transient impact source is used to generate Rayleigh wave energy that propagates horizontally near the surface layer of the pavement. Through two vertical accelerometers, the motion of the wave at the range of each frequency is recorded. The phases differences from the cross-power spectrum is then unwrapped and the dispersion curve of the shear wave velocity versus wavelength are then generated. An inversion process is iteratively employed to confirm the experimental dispersion curve from the theoretical model established. The SASW field test in this study was utilized to collect data on flexible and rigid pavement. The wave velocity profiles had shown that the SASW method is able to detect all the distinct layers of pavement units. The dynamic elastic modulus of obtained were found to be useful in the assessment of Indonesian pavement system.

**Keywords** : SASW, dynamic stiffness, flexible and rigid pavement system

## PENDAHULUAN

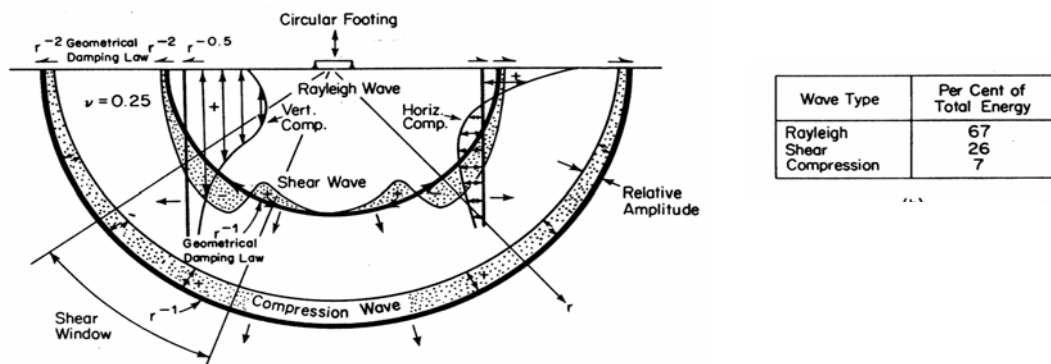
Kebijakan pasca-konstruksi menjadi lebih signifikan disebabkan bermulanya berbagai kesulitan yang ditimbulkan dalam kegiatan-kegiatan perawatan, rehabilitasi dan manajemen jaringan jalan yang sudah ada agar tetap dapat digunakan secara baik. Saat ini, ketika jaringan jalan sudah semakin luas dan mempertimbangkan faktor ekonomi serta biaya pemeliharaan jalan yang semakin mahal, maka diperlukan suatu sistem manajemen manajemen jalan (*Road Management System, RMS*) yang mampu mengevaluasi konstruksi secara baik dari tahap penilaian hingga rehabilitasi, dengan tujuan supaya jalan memiliki umur layanan yang lebih lama (Sjahdanulirwan, 2004). Ditambah lagi, bahwa kemampuan pemerintah dalam APBN dari tahun ke tahun sangat terbatas, sehingga alokasi dana program pemeliharaan jalan tidak dapat mencukupi kebutuhan pemeliharaan sehingga 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 teknologi pemeliharaan jalan di Indonesia sehingga pembinaan jalan dapat dilakukan secara efektif dan efisien.

Tahapan yang paling penting dalam RMS adalah membentuk suatu sistem yang mampu mengukur kondisi jalan saat ini dan memprediksi depresiasi kekuatannya di masa yang akan datang. Untuk mengetahui kapasitas kekuatan struktur suatu perkerasan jalan memerlukan pengukuran nilai struktural yang diwujudkan dengan nilai modulus elastisitas dan ketebalan setiap lapisannya secara akurat. Beberapa metode telah dikembangkan untuk menilai kondisi struktur perkerasan baik yang berupa pengujian merusak (*destructive testing, DT*) dan pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing, NDT*). Salah satu teknik NDT yang prinsip pengujiannya berdasarkan pemanfaatan gelombang permukaan Rayleigh dikenal sebagai metode *Spectral Analysis of Surface Wave (SASW)*. Metode ini merupakan salah satu pengujian yang berpotensi untuk menentukan parameter kekakuan dinamik jalan berupa kecepatan gelombang geser dan ketebalan lapisan perkerasan. Dalam makalah ini

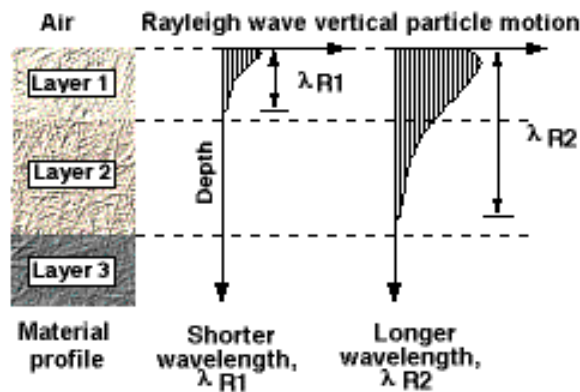
disampaikan diskripsi tentang kajian potensi metode analisis gelombang seismik permukaan sebagai pengembangan teknik evaluasi perkerasan jalan lentur dan kaku pasca konstruksi di Indonesia. Makalah ini juga menyampaikan studi kasus penggunaan metode SASW untuk evaluasi kondisi struktur perkerasan lentur (*flexible pavement*) jalan di jalan propinsi Prambanan – Pakem, Yogyakarta dan model perkerasan kaku (*rigid pavement*) jalan.

### KARAKTERISTIK GELOMBANG PERMUKAAN

Dalam aplikasi bidang geofisik, pemanfaatan gelombang seismik telah memberikan kontribusi yang besar untuk keperluan investigasi permukaan bumi. Penggunaan gelombang seismik yang merambat secara mekanis dalam media dibedakan menjadi dua macam yaitu gelombang badan (gelombang Primer/*compression wave* dan gelombang Sekunder/*shear wave*) dan gelombang permukaan (gelombang Rayleigh dan gelombang Love). Apabila suatu energi mekanik diberikan di atas permukaan suatu media, kedua jenis gelombang akan menyebar dengan besaran energi, bentuk perpindahan partikel gelombang dan arah perambatan yang berbeda (Gambar 1).



Gambar 1. Penyebaran gelombang seismik (Richart *et al.*, 1970)



Gambar 2. Sifat penetrasi partikel gelombang Rayleigh (Rosyidi *et al.*, 2002)

Gelombang permukaan Rayleigh dengan 67 % persentase energi mekanik selanjutnya bergerak sepanjang permukaan dan amplitudonya akan berkurang secara cepat sesuai kedalaman perambatan. Pergerakan gelombang Rayleigh berlaku secara menyebar (*dispersion*) yang merupakan suatu fenomena natural dari fungsi kecepatan terhadap panjang gelombang dan frekuensinya. Sifat penetrasi gelombangnya pada suatu media juga dipengaruhi oleh panjang gelombang dan frekuensi. Gambar 2 menjelaskan bahwa panjang gelombang pendek dengan frekuensi tinggi hanya merambat pada permukaan yang dangkal, sedangkan gelombang yang lebih panjang dengan frekuensi rendah dapat merambat lebih dalam.

Melalui konsep tersebut, Jones (1958) memulai aplikasi metode gelombang permukaan Rayleigh dengan menggunakan vibrator harmoni yang stabil pada struktur tanah dan jalan raya. Nazarian dan Stokoe (1984) melengkapi proses analisis hasil SASW secara lebih efisien dan komprehensif untuk diaplikasikan dalam penentuan modulus elastisitas dan ketebalan profil tanah dan jalan raya. Penggunaan metode SASW secara berkelanjutan telah diaplikasikan sebagai pengujian evaluasi pada infrastruktur diantaranya identifikasi konstruksi fondasi bangunan (Madhus & Westerdhal, 1990, Stokoe *et al.*, 1994), pendeteksian profil tanah (Matthews *et al.*, 1996), penilaian struktur beton (Rix *et al.*, 1990 dan Cho, 2002), pendeteksian lapisan pada struktur mortar semen (Cho *et al.*, 2001), kontrol kepadatan konstruksi tanah timbunan (Kim *et al.*, 2001) dan struktur balas kereta api (Zagyapan & Fairfield, 2002). Selain itu, Gucunski (2000) secara numerik dan melalui beberapa riset yang dilakukan menunjukkan bahwa gelombang permukaan sangat sensitif untuk mendeteksi adanya anomali yang terletak di permukaan suatu media. Penggunaan metode SASW untuk evaluasi jalan pasca konstruksi dengan mengamati perolehan nilai kekakuan bahan jalan di Malaysia dan Indonesia telah dimulai secara berkelanjutan oleh Rosyidi *et al.* (2002, 2003, 2004a, 2004b, 2005); dan Rosyidi (2004). Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa pemakaian SASW dapat dikembangkan sebagai suatu metode pendeteksi kerusakan dini dalam sistem manajemen infrastruktur pasca-konstruksi.

## **METODE ANALISIS SPEKTRUM GELOMBANG PERMUKAAN UNTUK EVALUASI PERKERASAN JALAN**

Metode analisis spektrum gelombang permukaan atau metode SASW merupakan evolusi teknologi dari teknik gelombang permukaan dalam keadaan tetap (*steady state surface wave technique*) yang tidak memerlukan pengeboran jalan (*boreholes*) dan juga merupakan metode pengujian lapangan (*in-situ method*) untuk mengukur secara detil profil kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity profile*) yang bekerja pada permukaan lapisan. Metode ini melibatkan tiga tahapan utama analisis (Nazarian & Stokoe, 1984, Rosyidi, 2004), yaitu

- a. Proses pengambilan data di lapangan, menggunakan penganalisis spektrum (*spectrum analyzer*),
- b. Pembuatan kurva dispersi eksperimen kecepatan gelombang Rayleigh melawan frekuensi atau panjang gelombang,
- c. Proses inversi kurva dispersi eksperimen untuk mendapatkan profil akhir.

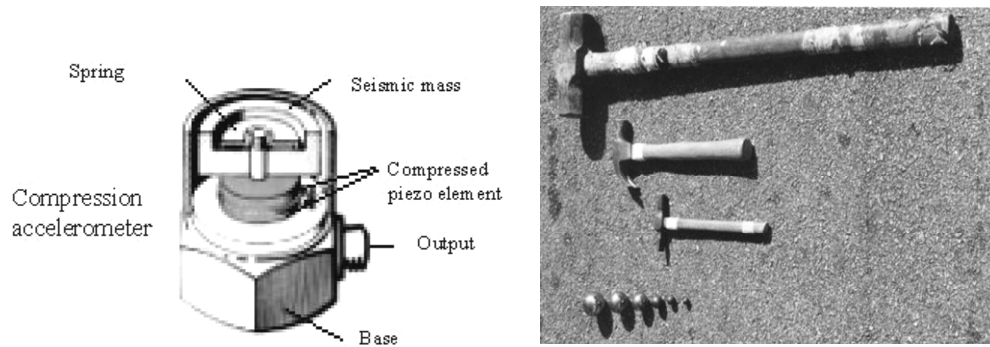
### **Metodologi Pengukuran Data Seismik Lapangan**

Dalam proses pengambilan data lapangan, metode ini melibatkan serangkaian sumber gelombang mekanik yang digunakan untuk membangkitkan gelombang sementara (*transient*) dengan berbagai wilayah nilai frekuensi yang berbeda. Peralatan yang digunakan untuk pengukuran data seismik di lapangan diantaranya :

#### **1. Sensor Pengukur Percepatan**

Untuk merekam perambatan gelombang yang dihasilkan, digunakan dua (*two-channel SASW*) atau lebih (*multi-channel SASW*) penerima gelombang (*receivers*) atau sensor. Untuk pengukuran di perkerasan jalan, sensor gelombang jenis pengukur percepatan (*accelerometer*) berkapasitas 20 kHz dapat digunakan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3(a). Sensor pengukur pergerakan partikel gelombang yang diletakkan sejajar dalam suatu garis imajiner lurus di atas permukaan media (Gambar 4). Jarak antara sensor ditentukan berdasarkan proses sampling penetrasi gelombang yang direncanakan (Gazetas, 1991; Stokoe *et al.*, 1994). Beberapa set pengujian dengan jarak antara sensor yang berbeda disyaratkan untuk mendeteksi kedalaman pencapaian gelombang dalam media. Jarak sensor pendek dengan sumber frekuensi tinggi digunakan untuk mendeteksi lapisan yang dangkal sedangkan jarak sensor yang panjang dan sumber gelombang berfrekuensi rendah digunakan untuk mendapatkan lapisan yang lebih dalam. Jarak antar sensor yang direkomendasikan untuk digunakan dalam pengujian SASW di perkerasan jalan, meliputi 4 dan 8 cm untuk mengesan sampel gelombang pada lapisan permukaan jalan (lapisan aspal

maupun beton), 16 dan 32 cm untuk lapisan fondasi jalan dan 64 serta 100 cm untuk lapisan tanah dasar. Untuk kasus, lapisan tanah dasar yang lunak (soft soil), penggunaan sensor dengan jenis Geophone adalah disarankan. Ini karena geophone memiliki sensitifitas yang lebih baik untuk merekam gelombang berfrekuensi rendah.

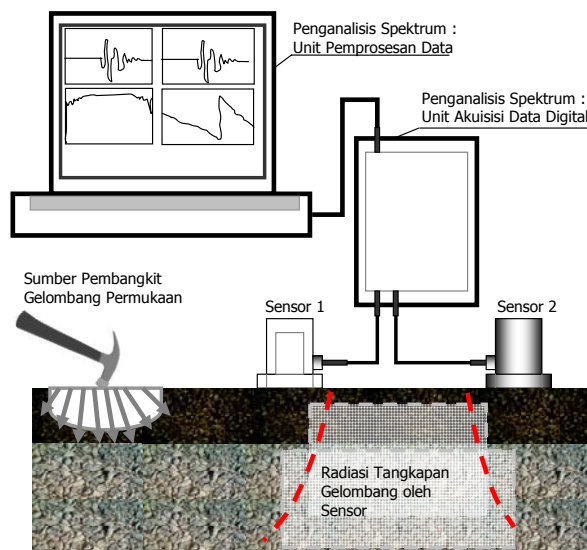


(a). Sensor Pengukur Percepatan (b). Satu set sumber gelombang



(c). Unit akuisisi dan komputer sebagai penganalisis spektrum

**Gambar 3.** Peralatan metode analisis spektrum gelombang permukaan



**Gambar 4.** Konfigurasi pengukuran SASW menggunakan 2 sensor

## 2. Sumber Pembangkit Gelombang

Sumber gelombang berfrekuensi tinggi digunakan untuk mendapatkan data perambatan gelombang pada lapisan media yang keras (misalkan : lapisan beton, aspal, fondasi batu keras dan padat, dll.) sedangkan sumber gelombang berfrekuensi rendah dipakai untuk memperoleh sampel data gelombang pada lapisan media yang lebih lunak (misalkan : lapisan tanah dasar dipadatkan dan tanah asli dengan berbagai jenis klasifikasi tanah). Gelombang seismik berfrekuensi tinggi dapat diperoleh dari *solenoid-operated impactor*, palu ringan, hentaman mekanik bola baja (*steel ball bearing*) dan *V-meters* sedangkan pemberat yang dijatuhkan bebas (*large drop weights*), palu berat dan *bulldozers* digunakan untuk membangkitkan gelombang berfrekuensi rendah. Gambar 3(b) menunjukkan pembangkit gelombang berupa bola baja (ukuran 5 hingga 15 gram) dan palu ringan hingga berat (2 hingga 4 kg) yang digunakan untuk pengujian SASW di perkerasan lentur maupun kaku.

## 3. Penganalisis Spektrum

Dalam studi ini, untuk memproses digitalisasi data gelombang digunakan satu set peralatan penganalisis spektrum berupa satu unit akuisisi Harmonie buatan 01dB Perancis dan satu perangkat komputer untuk analisis spektrum data gelombang (Gambar 3(c)). Untuk memudahkan pemrosesan spektrum gelombang digunakan algoritma FFT yang ada dalam perangkat lunak (*software*) dBFA 32.

### Metodologi Analisis Kurva Dispersi Eksperimen Kecepatan Gelombang Rayleigh

Data analog gelombang dari kedua sensor disalurkan melalui unit akuisisi data dalam digital kepada komputer untuk dilakukan proses analisis spektrum. Analisis spektrum dilakukan dalam domain frekuensi dengan terlebih dahulu melakukan proses analisis *fast fourier transform* (FFT) terhadap data gelombang yang selanjutnya ditampilkan dalam beberapa bentuk spektrum diantaranya spektrum tenaga auto (*auto-power*), fungsi perpindahan (*transfer function*) dan koheren (*coherence*). Spektrum tenaga auto,  $G_{xx}(f)$ , didefinisikan sebagai hasil perkalian spektrum linear,  $S_x(f)$  dan bilangan kompleksnya,  $S_x^*(f)$ , yaitu:

$$G_{xx}(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad (1)$$

disini  $S_x(f)$  adalah spektrum linier 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 magnitudo dan fase. Fungsi perpindahan,  $H(f)$ , merupakan perbandingan nilai output terhadap input spektrum linier gelombang, yang dinyatakan dalam bentuk:

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \quad (2)$$

Fungsi perpindahan juga dikenali sebagai fungsi respon 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:

$$H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} = \frac{A_2}{A_1} \{ \cos(\phi_2 - \phi_1) + i \sin(\phi_2 - \phi_1) \} \quad (3)$$

disini  $(\phi_2 - \phi_1)$  adalah perbedaan nilai fase di antara dua komponen gelombang yang ditentukan oleh sudut fase yang diperolehi dari kedua sensor gelombang. Selanjutnya data ini dapat digunakan untuk menghitung kecepatan fase dalam pembuatan kurva penyebaran lapangan dari pengukuran SASW (Joh 1996) dan sifat pelemahan suatu sistem linear (Gucunski 1991). Fungsi koheren didefinisikan sebagai perbandingan tenaga output yang disebabkan oleh input terhadap seluruh output yang diukur. Fungsi ini dinyatakan sebagai:

$$\gamma^2(f) = \frac{[G_{yx}(f) \cdot G_{yx}^*(f)]}{[G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)]} \quad (4)$$

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) juga menyatakan bahwa nilai koheren yang boleh digunakan sebagai parameter pengukuran bagi sinyal yang baik bernilai lebih dari 0.98. Bagaimanapun juga, nilai koheren yang rendah tidak hanya sepenuhnya disebabkan oleh kualitas korelasi yang rendah diantara sinyal. Terdapat beberapa faktor lainnya seperti resolusi lebar jalur frekuensi yang rendah dan sinyal masukan yang berganda (Nazarian, 1984) yang menyebabkan nilai koheren yang rendah.

Kurva dispersi kecepatan gelombang Rayleigh diperoleh dari data fase gelombang dan frekuensi dari spektrum gelombang perpindahan (hasil perhitungan menggunakan Persamaan 4). Untuk menghitung kecepatan fase gelombang di perkerasan jalan dapat diterapkan algoritma sederhana dari metode perbedaan fase (*phase different method*), sebagaimana direkomendasikan dari Joh (1996) dan Rosyidi (2004), yang berdasarkan konsep waktu pergerakan gelombang. Waktu pergerakan gelombang ( $t$ ) boleh dihitung daripada nilai beda fase ( $\phi$ ) dari kedua sensor menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\phi = 2\pi f_0 t \quad (5)$$

$$t = \frac{\phi}{2\pi f_0} \quad (6)$$

Selanjutnya jika jarak antara dua sensor ( $d$ ) ditetapkan maka kecepatan gelombang Rayleigh ( $V_R$ ) dan panjang gelombang ( $\lambda$ ) boleh ditentukan daripada :

$$V_R = \frac{d}{t_1} = f_0 \cdot \lambda \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{d}{\phi/2\pi} \quad (8)$$

Keseluruhan data dalam spektrum perpindahan dianalisis untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang Rayleigh dan panjang gelombang yang selanjutnya membentuk kurva dispersi eksperimen individu untuk setiap spektrum jarak sensor tertentu. Kurva dispersi eksperimen gabungan kecepatan gelombang Rayleigh dibangun dengan menggabungkan kurva dispersi individu sehingga diperoleh sampel gelombang pada setiap lapisan perkerasan sebagaimana.

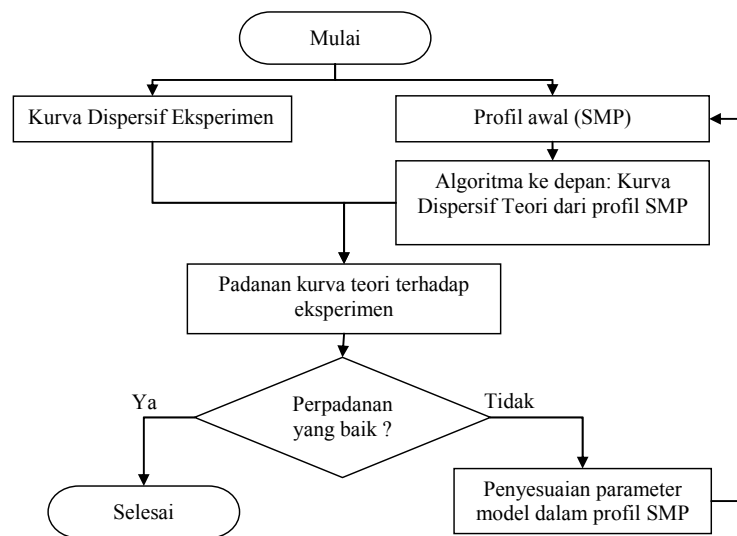
### Metodologi Analisis Profil Kecepatan Gelombang Geser melalui Inversi Kurva Dispersi Eksperimen

Langkah terakhir adalah inversi kurva dispersi eksperimen gabungan kecepatan gelombang Rayleigh diperoleh dari tahap sebelumnya. Proses inversi terbagi dalam dua metode yaitu inversi sederhana (*simple-inversion*) dan inversi canggih (*refined-inversion*). Inversi sederhana lebih sesuai untuk observasi profil tanah dengan perbedaan kekakuan antar lapisan yang tidak ekstrim sedangkan untuk profil perkerasan lebih sesuai menggunakan inversi canggih. Konsep inversi canggih adalah membangun perhitungan ulang (*backcalculation*) dengan membuat suatu profil mula yang mengasumsikan terlebih dahulu parameter-parameter kecepatan gelombang geser, berat volume bahan, angka Poisson dan angka peredaman (*damping*) setiap lapisan perkerasan yang ditinjau.

Dalam tahapan ini, kurva dispersi eksperimen gabungan dianalisis dengan perhitungan balik (*backcalculation*) atau inversi untuk menghasilkan profil kecepatan gelombang geser perkerasan jalan. Proses inversi dimulai dengan menentukan profil awal perkerasan jalan terlebih dahulu dengan mengasumsikan beberapa data parameter dinamik bahan berupa kecepatan geser (*shear wave velocity*,  $V_{SB}$ ), ketebalan lapisan, rasio Poisson, kepadatan bahan (*density*) dan faktor peredaman (*damping factor*). Berdasarkan profil asumsi tersebut, kurva dispersi teori dihasilkan menggunakan perhitungan teori matrik kekakuan dinamik (Kausel & Rösset, 1981 ; Rosyidi, 2004). Persamaan (2) di bawah ini merupakan persamaan dasar untuk analisis 3 D matrik kekakuan bahan (Rosyidi 2007) dalam bentuk diskritnya.

$$w_{SB}(r) = -\frac{i\pi qR}{2} \sum_{l=1}^{2N} \frac{(\phi_z^{ll})^2 J_1(k_l R_l) H_0^{(2)}(k_l r)}{k_l} \quad (9)$$

dengan,  $w_{SB}$  = perpindahan partikel gelombang secara vertikal,  $q$  = vektor beban,  $R$  = radius beban,  $J_{rB}$  = fungsi Bessel,  $H_{rB}$  = fungsi Hankel,  $k$  = nomor gelombang dan  $r$  = domain ruang. Untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman struktur perkerasan jalan yang sebenarnya dilakukan proses optimisasi dengan memadukan (*matching*) antara kurva dispersi teori terhadap eksperimen. Optimasi perpaduan antara kurva teori dan eksperimen untuk perkerasan jalan dapat menggunakan metode kemiripan maksimum (*likelihood method*) yang konsep dan detail penurunannya sebagaimana dijelaskan dalam Joh (1996) dan Rosyidi (2004). Kontrol perpaduan ini dilakukan dengan nilai *root-mean square* (RMS), semakin kecil nilai RMS akan diperoleh bentuk profil analisis SASW yang lebih mendekati kondisi sebenarnya di lapangan. Diagram alir proses inversi diberikan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir proses inversi dalam penelitian (Rosyidi, 2009)

### Analisis Modulus Elastisitas Dinamik Bahan

Berasaskan teori teknik perambatan gelombang, modulus geser maksimum bahan pada regangan di bawah 0.0003 % dapat ditentukan dari kecepatan perambatan gelombang geser sebagai (Kramer, 1996):

$$G = \rho V_s^2 \quad (10)$$



disini,  $\rho$  adalah berat jenis, diperoleh dari  $\frac{\gamma_t}{g}$ , dimana  $\gamma_t$  adalah berat unit bahan dan  $g$

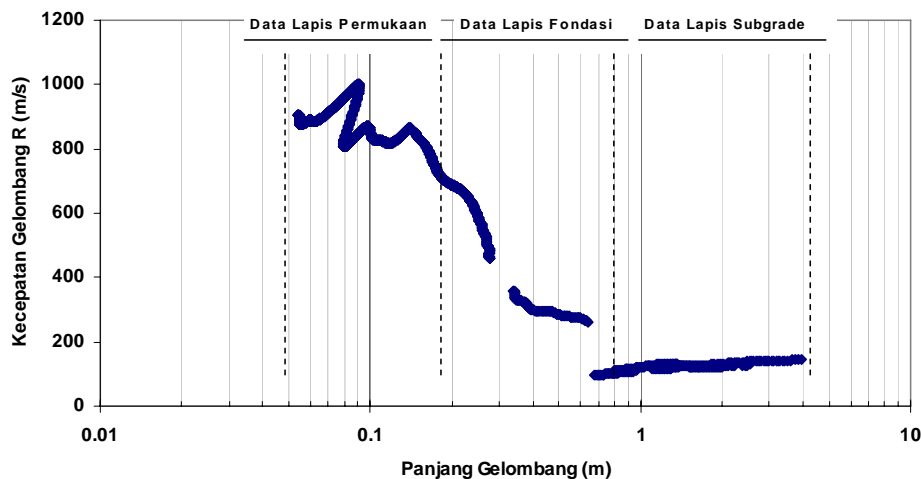
merupakan nilai gravitasi. Modulus elastik bahan pula dapat dihitung menggunakan nilai kecepatan gelombang apabila nisbah Poisson ( $\nu$ ) bahan diketahui. Berdasarkan teori elastik (Yoder & Witczak, 1975), modulus elastik ( $E$ ) dapat ditentukan sebagai :

$$E = 2 G (1 + \nu) = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \quad (11)$$

## HASIL STUDI KASUS APLIKASI PENGUJIAN SASW

### Pengujian pada Perkerasan Lentur Jalan

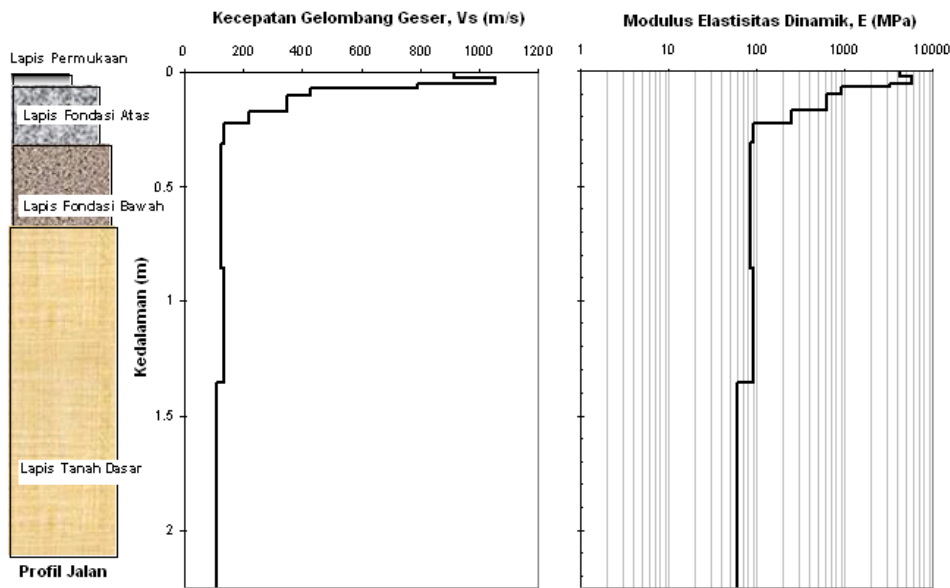
Studi kasus penerapan metode analisis spektrum gelombang permukaan (SASW) dilakukan pada ruas Jalan Propinsi Prambanan-Pakem, Daerah Istimewa Yogyakarta. Gambar 6 menunjukkan kurva dispersi eksperimen gabungan yang diperoleh dari satu set pengukuran di Jalan Propinsi Prambanan – Pakem. Dalam gambar ditunjukkan bahwa kecepatan gelombang Rayleigh terlihat menyebar sesuai dengan nilai kekakuan lapisan perkerasan jalan. Untuk lapisan permukaan aspal, kecepatan gelombang Rayleigh ditunjukkan dalam wilayah 780 – 1020 m/s, sedangkan untuk lapisan fondasi jalan (*base* dan *subbase course*) dan lapisan tanah dasar masing-masing ditunjukkan dalam nilai 300 hingga 700 m/s dan 90 hingga 180 m/s.



**Gambar 6.** Kurva dispersi gabungan eksperimen untuk Jalan Prambanan-Pakem

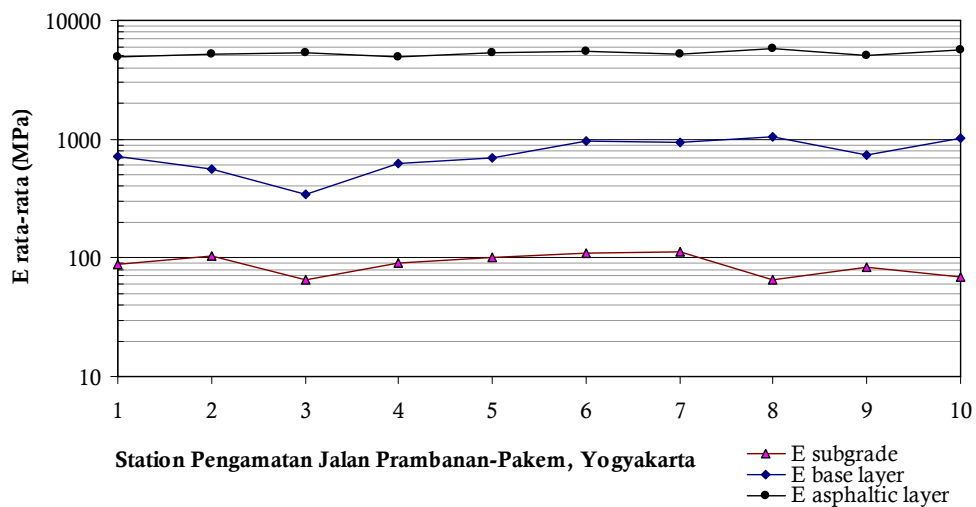
Dari kurva dispersi eksperimen (Gambar 6), dilakukan inversi canggih dengan model matrik kekakuan 3 D dan metode optimasi kemiripan maksimum (*maximum likelihood*) sebagaimana direkomendasikan oleh Joh (1996) dan Rosyidi (2004) untuk analisis perkerasan jalan. Hasil inversi ditunjukkan dalam Gambar 7.

Dari profil kecepatan gelombang geser dapat diperoleh nilai modulus elastisitas dinamik bahan dengan analisis sederhana menggunakan Persamaan (9) dan (10). Hasil studi menunjukkan bahwa lapisan permukaan aspal pada perkerasan jalan studi terdiri dari 3 lapisan susun dengan nilai kekakuan yang berbeda yang masing-masing nilai modulus elastisitas dinamik bernilai 3195 MPa, 4282 MPa dan 5720 MPa. Untuk lapisan fondasi, baik fondasi atas maupun bawah diperoleh pada wilayah 248 hingga 937 MPa, sedangkan nilai modulus elastisitas lapisan tanah dasar diperoleh sebesar 61 hingga 94 MPa yang dideteksi hingga kedalaman 2,4 meter.



**Gambar 7.** Profil akhir kecepatan gelombang geser dan modulus elastisitas dinamik dari hasil inversi analisis SASW

Untuk pengukuran SASW pada beberapa station pengamatan di Jalan Prambanan-Pakem, Yogyakarta, dapat digambarkan profil struktur perkerasan jalan yang menunjukkan properti struktur (modulus elastisitas dinamik rata-rata) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.

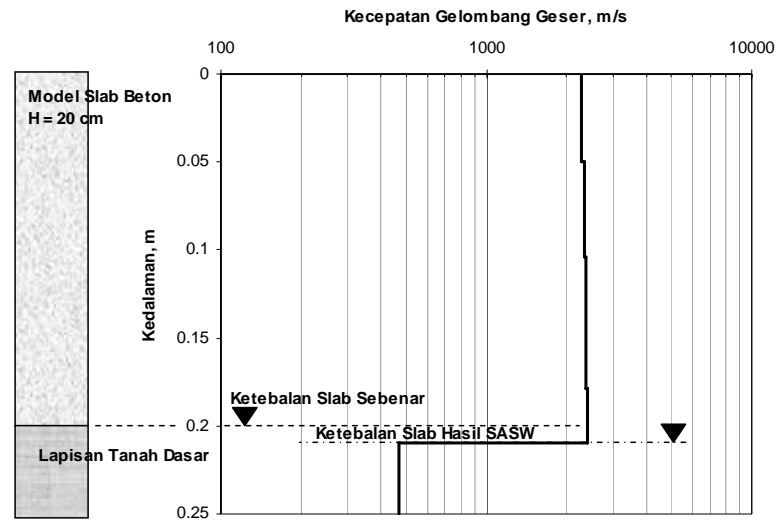


**Gambar 8.** Profil modulus elastisitas dinamik rata-rata setiap lapisan penyusun perkerasan jalan di Jalan Prambanan-Pakem, Yogyakarta

### Pengujian pada Perkerasan Kaku Jalan

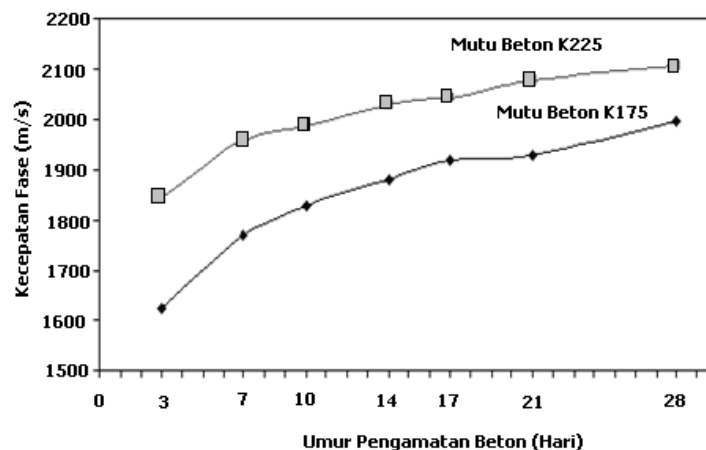
Studi kasus untuk perkerasan kaku dilakukan pada model fisik skala 1 : 1. Perkerasan kaku disusun untuk K175 dan K225. Salah satu hasil akhir profil inversi kecepatan gelombang geser model untuk ketebalan slab 20 cm dengan mutu beton K225 diberikan dalam Gambar 9. Dari Gambar 9 tersebut dapat ditunjukkan bahwa nilai kecepatan gelombang geser untuk slab beton pada umur 10 hari antara 2.272 hingga 2.400 m/s. Nilai kecepatan yang tinggi mengindikasikan sifat bahan yang kaku. Nilai tersebut bersesuaian dengan nilai kewajaran kecepatan gelombang geser untuk beton sebagaimana direkomendasikan oleh Nazarian (1984) untuk beberapa mutu beton pada struktur jalan pada wilayah 2.000 – 2.600 m/s.

Ketebalan slab beton hasil pengukuran SASW (20,96 cm) menunjukkan penyimpangan nilai yang relatif kecil (Gambar 9) yaitu sebesar 4,59 % terhadap tebal slab model fisik (20,04 cm). Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan teknik SASW lainnya yang mampu mendeteksi ketebalan perkerasan kaku dengan tingkat selisih yang rendah.



**Gambar 9.** Profil Perkerasan Kaku Hasil Uji SASW Terhadap Model Fisik

Kecepatan fase (gelombang Rayleigh) dapat menjadi parameter dinamik pengukuran sifat pengerasan beton terhadap waktu perawatan. Dari hasil studi yang dilakukan menunjukkan adanya trend kurva yang semakin meningkat dari 3 hari ke 28 hari untuk kedua mutu beton K175 dan K225, sebagaimana diberikan dalam Gambar 10. Kondisi ini menjelaskan kemampuan parameter dinamik (kecepatan fase) hasil pengukuran metode SASW sebagai indikator pengukur perubahan kekakuan beton secara lebih mudah dalam model perkerasan kaku. Gambar 10 juga menunjukkan perubahan kecepatan gelombang fase yang ekstrim pada pengerasan beton 3 hingga 14 hari, hal ini dindikasikan proses kimiawi laju pengerasan beton masih berjalan intensif. Selanjutnya pada umur di atas 14 hari perubahan nilai kecepatan fase menjadi relatif kecil. Indikasi ini menunjukkan perubahan kekakuan pada waktu pengerasan beton mendekati umur 28 hari cenderung relatif tetap dan menuju pada grafik dengan kelandaian kecil.



**Gambar 10.** Pengamatan Nilai Kecepatan Fase Gelombang Terhadap Perubahan Pengerasan Beton Mutu K175 dan K225

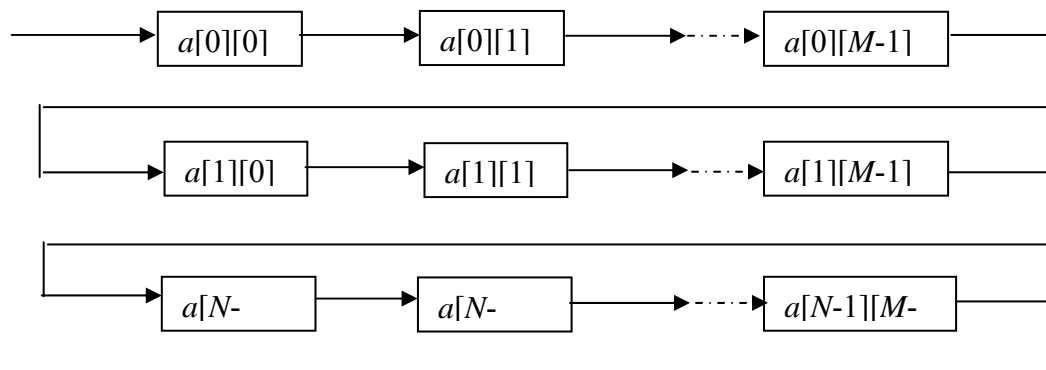
## PENGEMBANGAN METODE SASW (LATEI, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta)

Pada studi ini, metode NDT seismik gelombang permukaan yang telah dikembangkan kepada teknik analisis spektrum multi-sensor dan sistem analisis tomografi untuk menentukan profil 2-D modulus elastisitas jalan dan kedalaman. Teknik baru ini diberikan nama sebagai Teknik Analisis Tomografi Gelombang Permukaan (Tomography Analysis of Surface Waves, TASW) Tampilan profil 2-D ini dapat menunjukkan pola perubahan kekakuan (stiffness) struktur perkerasan jalan dengan baik dan sekaligus mampu mendeteksi anomali yang ada pada struktur jalan. Kalibrasi sistem tomografi ini dijalankan dengan melakukan pengujian lapangan yang dilakukan di beberapa titik di Jalan Raya Cipatik, Soreang, Bandung dan Jalan Cagak, Subang Jawa Barat. Mekanisme pengukuran lapangan dalam teknik TASW melibatkan tiga tahapan utama yaitu (1) perekaman data seismik perkerasan, (2) pembangunan kurva dispersi kecepatan fase eksperimen, dan (3) inversi kurva dispersi dan analisis tomografi. Tahap kedua dan ketiga masih menggunakan metodologi yang sama dengan SASW. Oleh itu, berikut ini dijelaskan tahapan pengujian TASW untuk tahapan ketiga.

### Analisis Tomografi

Profil tomografi 2-D modulus elastisitas jalan dianalisis dari penggabungan beberapa profil 1-D yang dihasilkan dari proses inversi. Algoritma pembangunan analisis tomografi 2-D dibangun berdasarkan metode susunan dua dimensi (*two dimensional array*) yang dijelaskan berikut ini.

1. Susunan dua dimensi digunakan untuk membentuk citra (*image*) tomografi 2 D. Konsep susunan pencitraan tomografi diberikan dalam Gambar 11.



**Gambar 11.** Pengaturan pixel dalam pencitraan tomografi 2 D menggunakan metode susunan dua dimensi dalam analisis ini

2. Citra kontinu 2 D  $a(x,y)$  dibagi dalam  $N$  baris dan  $M$  kolom. Persilangan baris dan kolom disebut sebagai *pixel*. Nilai yang diisikan dalam setiap pixel merupakan koordinat integer  $[m,n]$  dengan  $\{m = 0,1,2,\dots, M-1\}$  dan  $\{n = 0,1,2,\dots, N-1\}$  adalah  $a[m, n]$ .
3. Citra digital  $a[M,M]$  dalam ruang diskrit (*discrete space*) 2 D dihasilkan dari citra analog  $a(x,y)$  dalam ruang kontinu (*continuous space*) 2 D.
4. Prosedur pengolahan matrik aljabar digunakan bagi menyusun bentuk tomografi 2 D. Persepsi 2 D dibangun berdasarkan pengaturan secara vertikal bersamaan 1 D dan pengaturan horisontal 1 D. Suatu vektor turus  $M \times 1$ ,  $f$ , sebagai pengaturan horisontal 1 D, diberikan dalam bentuk :

$$f = \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(n) \\ \vdots \\ f(M) \end{bmatrix} \quad (12)$$

yang merupakan elemen  $f(n)$ , dengan  $n = 1, 2, \dots, M$ . Satu vektor baris  $1 \times N$ ,  $h$ , merupakan pengaturan horisontal 1 D dengan bentuk:

$$h = [h(1) \quad h(2) \quad \dots \quad h(n) \dots \quad h(N)] \quad (13)$$

yang merupakan elemen  $h(n)$ , dengan  $n = 1, 2, \dots, N$ . Satu matrik  $M \times N$ ,  $F$  merupakan pengaturan 2 D daripada kedua vektor baris dan kolom yang dituliskan dalam bentuk:

$$F = \begin{bmatrix} F(1,1) & F(1,2) & \dots & F(1,N) \\ F(2,1) & F(2,2) & \dots & F(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F(M,1) & F(M,2) & \dots & F(M,N) \end{bmatrix} \quad (14)$$

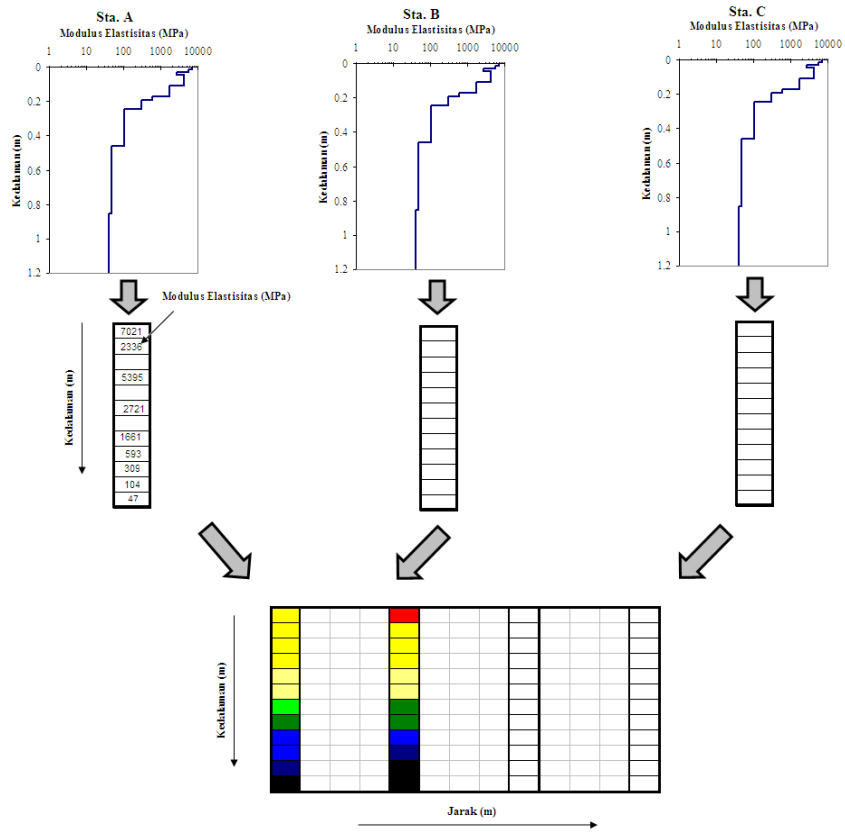
5. Analisis pemrograman dijalankan menggunakan *Visual Studio* dengan mode *VGA* yang memiliki resolusi  $640 \times 480$  atau lebih untuk pemrosesan citra tomografi kecepatan gelombang geser.

### Profil 2-D Modulus Elastisitas

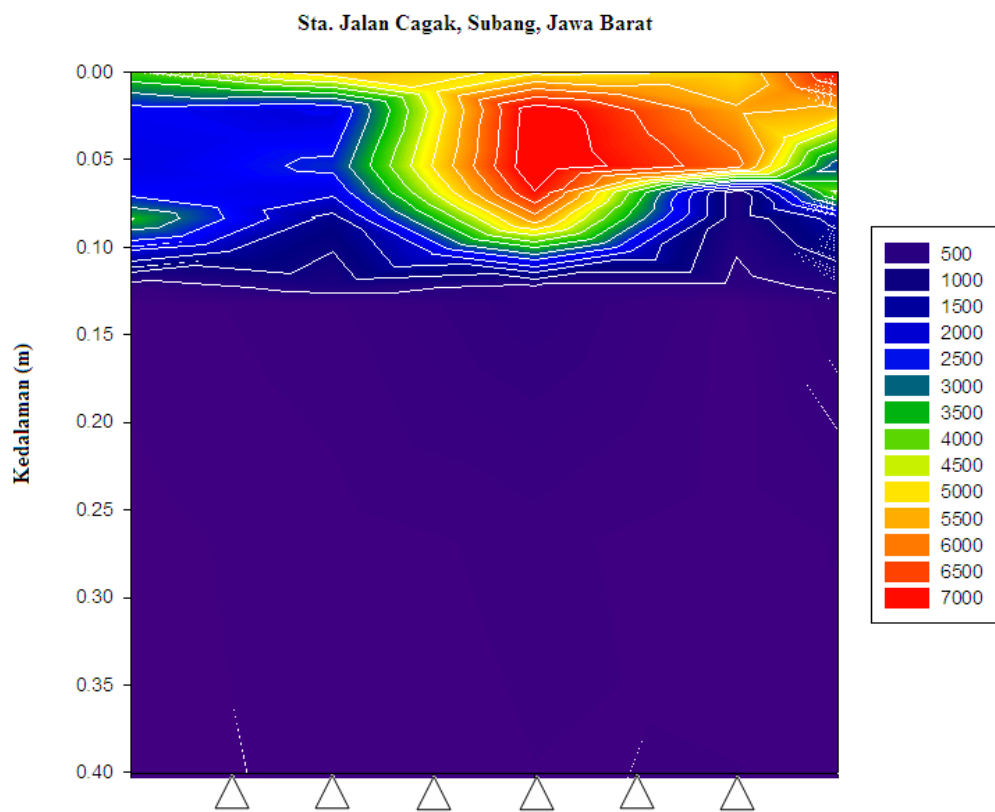
Konsep analisis tomografi adalah mendapatkan profil cross-section perkerasan jalan atau profil 2-D antara modulus elastisitas dan kedalaman yang dalam kasus ini dilakukan di Jalan Cagak, Subang, Jawa Barat. Profil tomografi ini diperolehi dari analisis susunan dua dimensi (*two dimensional array*). Dalam teknik ini, citra tomografi 2-D disusun dari suatu analisis pixel dengan resolusi  $640 \times 480$  atau lebih. Input yang dimasukkan dalam analisis pixel adalah informasi modulus elastisitas dan kedalaman. Satu kolom pencitraan mewakili satu profil 1-D. Satu pixel berisi nomor (nilai) modulus elastisitas dan masing-masing diberikan warna sesuai kategori spektrum warna. Analisis korelasi selanjutnya dilakukan pada setiap kolom untuk mengisi pixel antara kolom input. Gambar 12 menjelaskan konsep analisis tomografi yang dilakukan dalam penelitian ini.

Gambar 13 menunjukkan hasil akhir profil 2-D dari analisis tomografi modulus elastisitas perkerasan jalan pada beberapa Sta. di Jalan Cagak, Subang, Jawa Barat. Dari hasil yang diperoleh dapat ditunjukkan terdapat anomali pada lapisan permukaan jalan seperti yang diperlihatkan pada Sta awal dalam profil 2-D (kedalaman 0 hingga 15 cm). Ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan kualitas material penyusun lapisan yang bisa diakibatkan oleh pemadatan yang tidak merata atau ketebalan lapisan yang beragam.

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

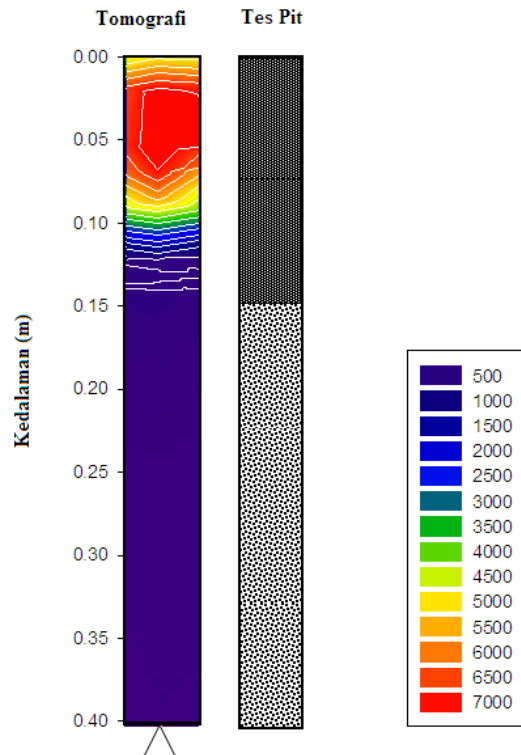


Gambar 12. Ilustrasi analisis tomografi untuk profil 2-D modulus elastisitas perkerasan jalan



Gambar 13. Hasil analisis tomografi profil modulus elastisitas Jalan Cagak, Subang

Pada Sta 165+560, dilakukan tes pit untuk mengetahui ketebalan lapisan yang sebenarnya. Hasil test pit menunjukkan bahwa lapisan permukaan ACWC sebesar 15 cm, lapisan Sirtu 27 cm dan selebihnya adalah tanah dasar (Gambar 14). Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 14 bahwa perbedaan antara lapisan permukaan hasil analisis TASW ( $T = 14,38$  cm) dan tes pit ( $T = 15$  cm) diperoleh sebesar 0,62 cm atau 4.13 %.



**Gambar 14.** Perbandingan tebal profil hasil TASW dan tes pit di Sta 165+560, Jalan Cagak

## KESIMPULAN DAN SARAN

Metode analisis spektrum gelombang permukaan Rayleigh atau dikenal sebagai metode SASW merupakan alternatif teknologi yang dapat dikembangkan di Indonesia untuk kontrol nilai kekakuan dalam term modulus elastisitas dinamik bahan perkerasan lentur dan kaku jalan pasca-konstruksi di Indonesia. Metode ini merupakan pengujian lapangan (*in-situ*) yang tidak memerlukan sampel, tidak merusak jalan dan dalam proses analisisnya tidak memerlukan waktu lama dan biaya yang mahal. Dari studi kasus yang dilakukan terindikasikan bahwa metode SASW mampu mengukur modulus elastisitas dinamik bahan untuk setiap lapisan profil perkerasan jalan secara detil pada setiap kedalaman yang diobservasi baik untuk perkerasan jenis lentur maupun kaku.

Pengembangan dan studi metode ini perlu dilakukan secara berkelanjutan untuk mendapatkan karakteristik teknis dan mengeksplorasi kemampuannya ini bagi sistem manajemen jalan di Indonesia. Studi selanjutnya dapat dilakukan dengan melakukan kajian SASW pada berbagai jenis bahan perkerasan yang ada di Indonesia dengan variasi sifat mekanisnya. Pada sisi lain, dapat pula mengembangkan metode SASW pada sistem berjalan (*mobile technology*) sehingga akan lebih mempercepat waktu pengambilan data.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis memberikan apresiasi dan penghargaan diantaranya kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum khususnya kepada Dr.Sjahdanulirwan, Dr.Furqon dan Dr.Siegfried, Pimpinan Proyek Peningkatan Jalan Prambanan-Pakem, yang telah membantu penulis untuk memulai aplikasi metode seismik bagi evaluasi jalan di Indonesia. Penulis juga menyampaikan apresiasi penghargaan dan terima kasih kepada Prof.Dr.Mohd. Raihan Taha (Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia), Prof.Dr.Nenad Gucunski (Rutgers University, USA) dan Prof.Dr.Sung Ho Joh (Chung Ang University, Korea) yang telah membantu dalam diskusi mengenai metode SASW. Terakhir, penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dan Faculty of Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia, yang telah memberikan sponsor untuk penelitian studi aplikasi SASW di Indonesia.

## REFERENSI

- Al-Hunaidi, M.O. 1992. Difficulties with Phase Unwrapping in Spectral Analysis of Surface Waves Nondestructive Testing of Pavements. *Canadian Geotechnical Journal* **29**, pp. 506-511.
- Cho, Y.S. 2002. NDT Response of spectral analysis of surface wave method to multi-layer thin high strength concrete structure, *Ultrasonic* **40**, pp. 227-230.
- Cho, Y.S. & Lin, F-B, 2001, Spectral analysis of surface wave response of multi-layer thin cement mortar slab structure with finite element thickness, *NDT&E International* **34** (2001), Elsevier Science, pp.115-122
- Gazetas, G. 1991. Foundation Vibrations: Foundation Engineering Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, Hsai-Yang Fang Editor, pp.553-593.
- Gucunski, N. 2000. Field Implementation of Surface Waves for Obstacle Detection (SWOD) Method, *Proc.of 15<sup>th</sup> WCNDT*, Roma 2000.
- Heisey, J.S. 1982. Determination of In Situ Shear Wave Velocity from Spectral Analysis of Surface Wave. Master of Science Thesis. University of Texas at Austin, 300p.
- Hvorslev, M.J., 1949. Subsurface exploration & sampling of soils for civil engineering purposes. Report on a Research Project of the Committee on Sampling and Testing Soil Mechanics and Foundations Division. Waterways Experimental Station.
- Jones, R.B. 1958. In-situ measurement of the dynamic properties of soil by vibration methods. *Geotechnique* **8** (1), pp.1-21.
- 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, 240p.
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 653p.
- Kim, D.S, Shin M.K & Park H.C., 2001, Evaluation of density in layer compaction using SASW method, *Soil Dynamic and Earthquake Engineering* **21** (2001), Elsevier Science, pp.39-46.
- Madshus, C. & Westerdahl, H. 1990. Surface wave measurements for construction control and maintenance planning of roads and airfields. *Proc. 3<sup>rd</sup>. Int. Conf. On Bearing Capacity of Roads and Airfields*, July 3-5, Trondheim, Norway.
- Matthews, M.C., Hope, V.S. & Clayton, R.I. 1996. The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods. *Proc. 30<sup>th</sup> Annual Conf. of the Eng. Group of the Geol. Soc.*, University of Lige, Belgium.
- Nazarian, S. 1984. In-situ determination of elastic moduli of soil deposits and pavement systems by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave Method. Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, 452 p.
- Nazarian, S. & Stokoe II, K. H. 1984. In-situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. *Proc. 8<sup>th</sup> World Conf. On Earthquake Engineering* **3**, pp 31-38.
- Richart, Jr., F.E., Woods, R.D. & Hall, Jr., J.R. 1970. Vibrations of soil and foundations. Ed. Ke-8. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.



- 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 Board* **1284**, Washington, D.C.
- 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., 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. The Symposium of Inter-University Transportation Studies Forum. University of Indonesia. Jakarta.
- Rosyidi, S.A., Taha, M.R. & Nayan, K.A.M. 2003. Determination the design input parameter of dynamic elastic modulus of road-pavement base layer using wave propagation technique. Proseding Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7 (KNTJ-7), Jakarta, 7 - 8 Oktober 2003.
- Rosyidi, S.A., Nayan, K.A.M. & Taha, M.R. 2004a. Measurement of subgrade stiffness using the SASW method. Proc. of Malaysian Geotechnical Conference at Petalingjaya Kuala Lumpur, 14-16 Maret 2004. The Institute of Engineer Malaysia.
- Rosyidi, S.A. & Taha, M.R. 2004b. Measurement of Pavement Moduli using Simple Surface Wave Propagation Technique. Proseding Simposium ke-7 Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi, Universitas Katolik Parahyangan, 11 September 2004.
- 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.
- Sjahanulirwan, M. 2004. Arah Kebijakan Pemerintah Mengenai Pemeliharaan Jalan Di Indonesia. Makalah disampaikan Stadium General Penandatanganan MoU antara Universitas Muhammadiyah Yogyakarta dengan Puslitbang Prasarana Transportasi, Balitbang Pekerjaan Umum, Departemen Pekerjaan Umum, Yogyakarta, 20 Desember 2004
- Stokoe, K.H. II, Wright, S.G., Bay, J.A. & Roesset, J.M., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geotechnical characterization of sites*, R.D. Wood, ed., Oxford and IBH Publishing Co., New Delhi, India, pp. 15-26.
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics. New York: John & Wiley Sons.
- William, O. 1981, Rayleigh wave velocity measurement using broad band frequency sources, Miscellaneous Paper EL-81-3, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Yoder, E.J. & Witczak, M.W. 1975. Principle of pavement design, John Willey & Sons, New York.
- Zagyapan, M. & Fairfield, C.A., 2002, Continuous surface wave and impact methods of measuring the stiffness and density of railway ballast, *NDT&E International* 35 (2002), Elsevier Science, pp.75-81

#### **Riwayat Hidup:**

**Dr. Sri Atmaja P. Rosyidi, ST., MSc.Eng, Ph.D., PE.**

Pekerjaan tetap: staf akademik di Program Studi Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta sejak April 2000.

Email: atmaja\_sri@umy.ac.id atau atmaja\_sri@hotmail.com

**Pendidikan:** menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Sipil UMY pada tahun 1999, dan menerima gelar MSc.Eng (Master of Science in Engineering) dan Ph.D. (Doctor of Philosophy) dari Department of Civil and Structural Engineering, National University of Malaysia pada tahun 2004 dan 2009. Pada tahun 2008, menyelesaikan program pascasarjana non-degree dari International School of Landslide Risk Analysis and Hazards Mitigation, University of Salerno, Italy.

**Pengalaman pekerjaan/akademik:**

(1). Dosen tetap di Jurusan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (Asisten Dosen: 2000-2001; AA: 2001-2007; Lektor: 2007-sekarang).

(2). Peneliti utama pada Center for Regional Energy Management (CREM/PUSPER) pada bidang Konservasi Energi pada Pembangunan Lingkungan (Infrastruktur dan Sistem Transportasi), 2006 – sekarang.

(2). Adjunct Professor, University of East London, Malaysian campus, di School of Civil Engineering (2008-2009);

(3). Adjunct Professor, Universiti Tenaga Nasional (Uniten) Malaysia pada program BSc/BEng dalam mata kuliah: Linear Algebra and Mathematics (2008),

(4). Research Assistant Professor (2009) pada Geotechnical Research Group, Visiting Assistant Professor pada program Master of Engineering, Dept.of Civil and Structural Engineering

(5). Postdoctoral Research Associate (Fellow) (2009 hingga sekarang) pada Geohazards and Geo-Environments Research Group di National University of Malaysia.

**Penelitian:** Telah dan sedang terlibat dalam 23 proyek penelitian yang didanai oleh UMY, Kementerian Pekerjaan Umum RI, Kementerian Pendidikan Tinggi RI, Ministry of Science, Technology and Innovation Malaysia dan Ministry of Foreign Affairs, Netherlands.

**Publikasi Ilmiah:** telah menerbitkan 30 makalah ilmiah pada Jurnal Internasional dan Nasional (Accrediated dan Non-Accredited); dan 60 makalah ilmiah di Konferensi/Seminar Internasional dan Nasional.

**Penghargaan:** Lulusan terbaik Fakultas Teknik UMY tahun 1999; 3 International Fellowship, Mendali Perunggu (Kategori Innovation in Building – Architecture – Civil Engineering Construction – Materials – Woodwork Category) pada Malaysian Technology Exhibition 2009 dan Malaysian Innovation and Research Expo and Competition 2004.

**Patent:** 2 produk penelitian.