

KAJIAN METODE ANALISIS GELOMBANG SEISMIK PERMUKAAN (SASW) UNTUK PENGEMBANGAN TEKNIK EVALUASI PERKERASAN LENTUR DAN KAKU DI INDONESIA

Sri Atmaja P. Rosyidi¹

Diterima 10 Juli 2006

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 phase 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

ABSTRAK

Keperluan suatu evaluasi jalan yang akurat, murah, cepat dan tidak merusak menjadi penting pada sistem perkerasan jalan di Indonesia karena proses rehabilitasi dan pengaturan jalan yang menjadi semakin sukar disebabkan oleh luasnya jaringan jalan yang ada dan adanya keterbatasan dana. Salah satu aspek penting dalam penilaian kualitas jalan di sistem perkerasan adalah kemampuan untuk mengukur kondisi perkerasan saat ini dan masa yang akan datang. Untuk menentukan kapasitas struktur

¹ Jurusan T. Sipil FT. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Lingkar Selatan Yogyakarta 55183, Email: atmaja_sri@umy.ac.id

jalan, diperlukan informasi yang tepat mengenai modulus dan ketebalan perkerasan. Tujuan makalah ini adalah untuk menunjukkan suatu metode spektrum analisis gelombang permukaan (SASW) yang berpotensi untuk menilai kekakuan dinamik perkerasan jalan. Metode SASW adalah suatu metode seismik lapangan yang tidak merusak yang berasaskan fenomena dispersi gelombang Rayleigh pada media yang berlapis. Satu set sumber gelombang transien digunakan untuk memunculkan energi gelombang Rayleigh yang merambat secara horisontal di permukaan perkerasan jalan. Melalui dua sensor akselerasi, gerak gelombang pada suatu wilayah frekuensi tertentu dapat direkam. Perbedaan data fase gelombang dari spektrum tenaga silang selanjutnya dianalisis dan kurva dispersi kecepatan fase dan panjang gelombang dapat digambarkan. Suatu proses inversi seterusnya dilakukan untuk mendapatkan penyesuaian kurva dispersi eksperimen terhadap kurva teori. Dalam kajian ini, metode SASW dilakukan pada perkerasan lentur dan kaku jalan. Profil kecepatan gelombang menunjukkan bahwa metode SASW mampu mendeteksi secara baik setiap lapisan perkerasan yang ada. Modulus elastik dinamik yang berhasil diukur dari metode ini dapat berguna untuk penilaian sistem perkerasan di Indonesia.

Kata kunci : SASW, kekakuan dinamik, sistem perkerasan lentur dan kaku

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 (Sjahanulirwan, 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

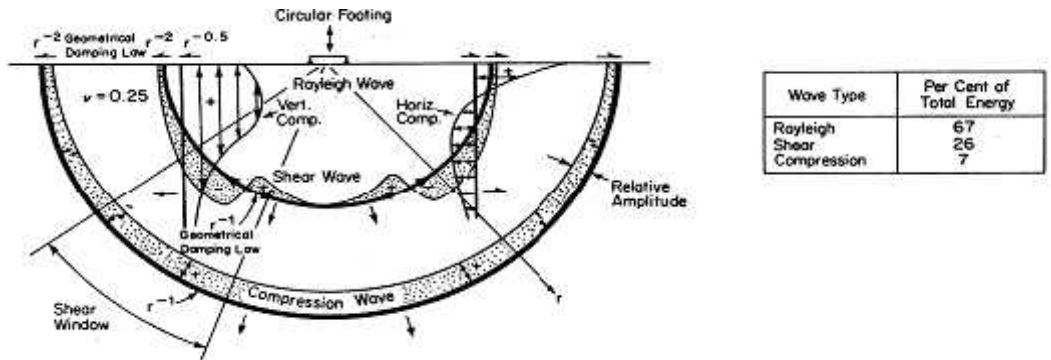
perkerasan baik yang berupa pengujian merusak (*destructive testing*, DT) dan pengujian tanpa merusak (*non-destructive testing*, NDT). Salah satu teknik NDT yang prinsip pengujiannya berdasarkan pemanfaatan gelombang permukaan Rayleigh dikenal sebagai metode *Spectral Analysis of Surface Wave* (SASW). 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

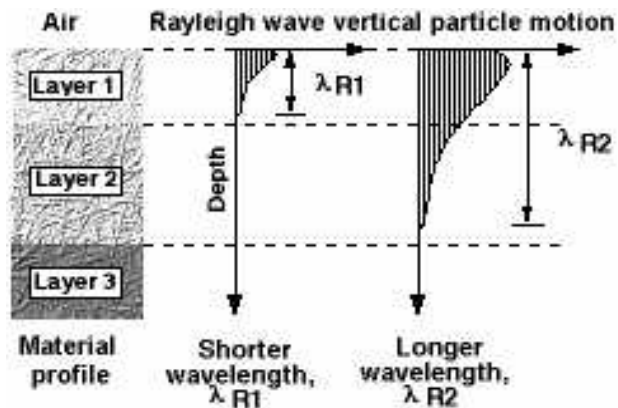
Dalam aplikasi bidang geofisik, pemanfaatan gelombang seismik telah memberikan kontribusi yang besar untuk keperluan investigasi permukaan bumi. Penggunaan gelombang seismik

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).

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.



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



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

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 (Madshus & Westerthal, 1990, Stokoe *et al.*, 1994), pendeteksian profil tanah (Matthews *et al.*, 1996), penilaian struktur beton (Rix *et al.*, 1990 dan Cho, 2002), pedeteksian 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 :

Sensor Pengukur Percepatan

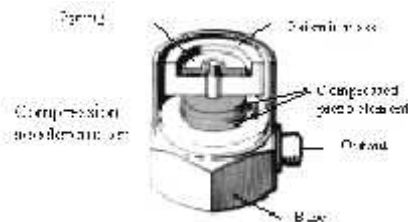
Untuk merekam perambatan gelombang yang dihasilkan, digunakan dua (*two-channel SASW*) atau lebih (*multi-channel SASW*) penerima gelombang (*receivers*) atau sensor. Untuk pengukuran di perkerasan jalan, sensor gelombang jenis pengukur percepatan (*accelerometer*) berkapasitas 20 kHz dapat digunakan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3. 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.

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. 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.



(a). Sensor Pengukur Percepatan

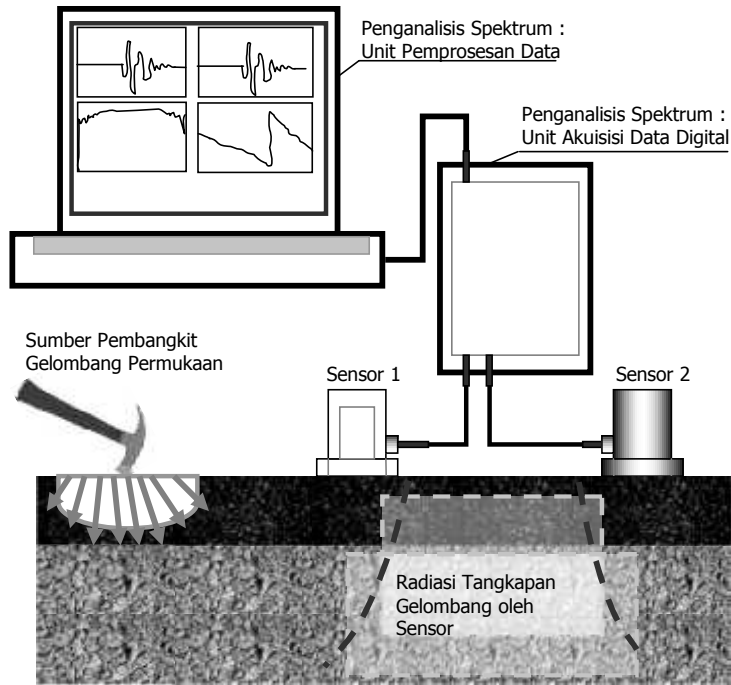


(b). Satu set sumber gelombang



(c). Unit akuisisi dan komputer sebagai penganalisis spektrum

Gambar 3. Peralatan metode analisis spektrum gelombang permukaan



Gambar 4. Konfigurasi pengukuran SASW menggunakan 2 sensor

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.). 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:

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

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:

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

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:

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

disini $(\phi_2 - \phi_1)$ adalah perbezaan 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:

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

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 perbezaan 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 (ϕ)

dari kedua sensor menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

$$T = \frac{\phi}{2\pi f_0} \dots\dots\dots(6)$$

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

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

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

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.

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. Selanjutnya melalui algoritma 2 D atau 3 D matrik kekakuan bahan (*stiffness matrix*) dan memasukkan dalam hubungan integrasi Fourier serta perhitungan fase diperoleh kurva dispersi teoritik (Kausel & Rösset, 1981). 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 detil penurunan persamaannya 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.

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):

$$G = \rho V_s^2 \dots\dots\dots(9)$$

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

unit bahan dan g merupakan nilai gravitasi. Modulus elastik bahan pula dapat dihitung menggunakan nilai kecepatan gelombang apabila nisbah Poisson (ν) bahan diketahui. Berasaskan teori elastik (Yoder & Witczak, 1975), modulus elastik (E) dapat ditentukan sebagai :

$$E = 2 G (1 + \nu) = 2 \rho V_s^2 (1 + \nu) \dots\dots\dots(10)$$

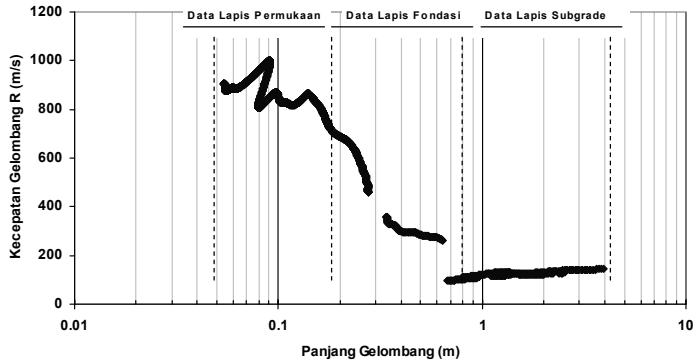
STUDI KASUS APLIKASI PENGUJIAN SASW

Pengujian pada Perkerasan Lentur Jalan

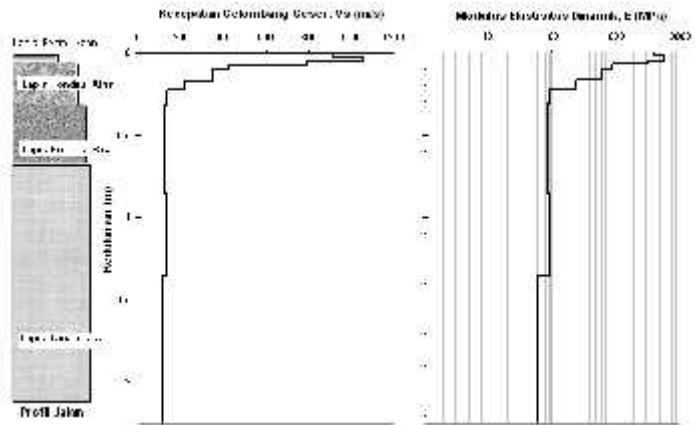
Studi kasus penerapan metode analisis spektrum gelombang permukaan (SASW) dilakukan pada ruas Jalan Propinsi Prambanan-Pakem, Daerah Istimewa Yogyakarta. ambar 5 menunjukkan kurva dispersi eksperimen gabungan yang diperoleh dari satu set pengukuran di Jalan Propinsi Prambanan-Pakem. Dalam gambar ditunjukkan 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. Dari kurva dispersi eksperimen (Gambar 5), 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 6.

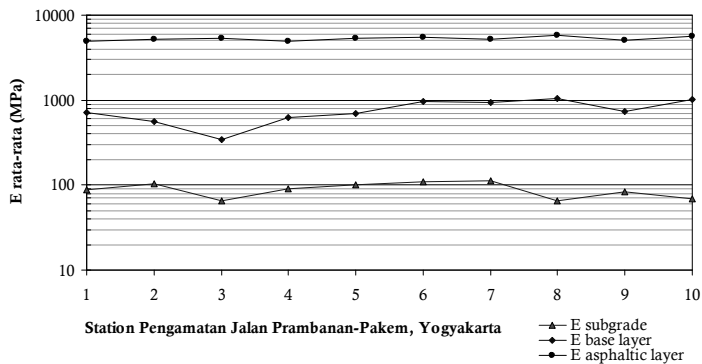
Dari profil kecepatan gelombang geser dapat diperoleh nilai modulus elastisitas dinamik bahan dengan analisis sederhana menggunakan Persamaan (9) dan (10). Hasil studi menunjukkan bahwa lapisan permukaan aspal pada perkerasan jalan studi terdiri dari 3 lapisan susun dengan nilai kekakuan yang berbeda 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. 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 7.



Gambar 5. Kurva dispersi gabungan eksperimen untuk Jalan Prambanan-Pakem



Gambar 6. Profil akhir kecepatan gelombang geser dan modulus elastisitas dinamik dari hasil inversi analisis SASW



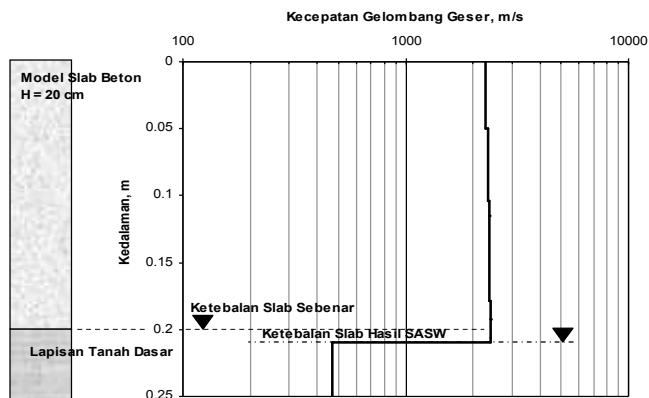
Gambar 7. Profil modulus elastisitas dinamik rata-rata setiap lapisan penyusun perkerasan jalan di Jalan Prambanan-Pakem, Yogyakarta

Pengujian pada Perkerasan Kaku Jalan

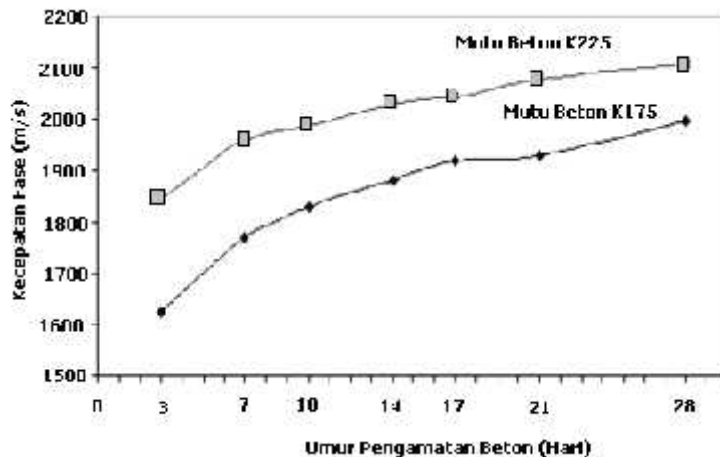
Studi kasus untuk perkerasan kaku dilakukan pada model fisik skala 1 : 1. Perkerasan kaku disusun untuk K175 dan K225. Salah satu hasil akhir profil inversi kecepatan gelombang geser model untuk ketebalan slab 20 cm dengan mutu beton K225 diberikan dalam Gambar 8. Dari Gambar 8 tersebut dapat ditunjukkan 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 (20,96cm) menunjukkan penyimpangan nilai yang relatif kecil (Gambar 8) 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.

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 9 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 8. Profil Perkerasan Kaku Hasil Uji SASW Terhadap Model Fisik



Gambar 9. Pengamatan Nilai Kecepatan Fase Gelombang Terhadap Perubahan Pengerasan Beton Mutu K175 dan K225

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 terindikasi 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 Prasarana Transportasi, Departemen Pekerjaan Umum khususnya kepada Dr.Sjahdanulirwan, Dr.Furqon dan Dr.Siegfried, dan Pimpinan Proyek Peningkatan Jalan Prambanan-Pakem, Sudaryoto, ST., 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, Ass.Prof.Khairul Anuar Mohd. Nayan, Prof.Dr.Abdurrahim Syamsudin (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 serta pemahaman mendalam 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.

DAFTAR PUSTAKA

- 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, 2nd Edition*, Hsai-Yang Fang Editor, pp.553-593.
- Gucunski, N. 2000. *Field Implementation of Surface Waves for Obstacle Detection (SWOD) Method*, Proc.of 15th 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. 3rd. 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. 30th 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. 8th 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., 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*. Prosiding 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*. Prosiding 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.

Sjahdanulirwan, 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