

**ANALISIS DATA SEISMIK GELOMBANG PERMUKAAN PADA LAPISAN ASPAL DENGAN MENGGUNAKAN METODE SASW (SPECTRAL ANALYSIS OF SURFACE WAVE)****SEISMIC DATA ANALYSIS OF SURFACE WAVE ON ASPHALT LAYER USING SASW METHODS (SPECTRAL ANALYSIS OF SURFACE WAVE)****Yudi Pranoto**Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda  
*pranoto\_yudi@yahoo.co.id***INTISARI**

*Metode Spectral Analysis of Surface Wave (SASW)* merupakan salah satu pengujian di lapangan yang tidak merusak, cepat, akurat dan ekonomis yang sedang dikembangkan penggunaannya dalam memperkirakan dan menilai kekuatan suatu struktur. Metode ini dibangun berdasarkan sifat perambatan gelombang rayleigh pada media yang berlapis. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai kecepatan gelombang geser dan modulus elastisitas perkerasan jalan menggunakan metode SASW pada jalan lama, baru dan jalan yang telah dioverlay.

Metode SASW mengandung tiga bagian utama yaitu pengambilan data lapangan, analisis data spektrum untuk pembuatan kurva dispersi kecepatan gelombang Rayleigh terhadap panjang gelombang dan proses inversi untuk membentuk kurva kecepatan gelombang geser terhadap kedalamannya.

Dari hasil analisis pada profil kecepatan gelombang geser dan modulus elastisitas terhadap kedalamannya pada perkerasan jalan baru, jalan lama dan jalan yang telah dioverlay diperoleh nilai kecepatan gelombang geser masing masing 685,5146 m/dt, 777,1562 m/dt dan 832,0904 m/dt. Sedangkan nilai modulus elastisitas masing masing 2678,177 Mpa, 5123,997 Mpa dan 3765,418 Mpa.

**Kata kunci:** SASW, Gelombang Rayleigh, kecepatan gelombang, modulus elastisitas

**ABSTRACT**

*Spectral Analysis of Surface Wave Methods (SASW)* is one of Non Destructive Test (NDT), fast, accurate and also economical. It's being developed to estimating and measuring the strength of a structure. This method based on rayleigh wave characteristic in layered media. The aims of this study are to determine the value of shear wave velocity and pavement modulus of elasticity using SASW method on old roads, new roads and roads that have been overlay.

SASW method contains three main parts: the collection of field data, the analysis of spectral data for the preparation of the Rayleigh wave velocity dispersion curves of the wave length and the process for forming a curve inversion shear wave velocity to the depths.

From the analysis of the profile of shear wave velocity and modulus of elasticity to the depth of the new road pavement, old roads and roads that have been overlay shear wave velocity values obtained each 685.5146 m/sec, 777.1562 m/sec and 832.0904 m/sec. While the value of the modulus of elasticity of each 2678.177 Mpa, 5123.997 Mpa and 3765.418 Mpa.

**Keyword:** SASW, Rayleigh wave, wave velocit, modulus of elasticity

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi jalan terus berkembang seiring dengan perkembangan jaman. Kegiatan pembangunan maupun perawatan jalan terus dilakukan agar jalan bisa dipergunakan dengan baik. Oleh karena itu diperlukan suatu kebijakan paska konstruksi seperti kegiatan perawatan, rehabilitasi dan manajemen jaringan jalan yang ada agar tetap dapat digunakan dengan baik. Oleh karena itu diperlukan suatu sistem evaluasi infrastruktur yang akurat, cepat, tidak mahal serta tidak mengganggu pergerakan lalu lintas.

Untuk mengetahui kapasitas kekuatan struktur suatu perkerasan jalan memerlukan nilai modulus elastisitas dan ketebalan setiap lapisan secara akurat. Metode yang telah dikembangkan untuk menilai kondisi struktur perkerasan jalan dibedakan menjadi dua yaitu pengujian yang bersifat merusak (*destructive testing*, DT) dan pengujian yang sifatnya tanpa merusak (*non destructive testing*, NDT). Salah satu NDT yang memanfaatkan gelombang permukaan Rayleigh dikenal sebagai metode SASW (*Spectral Analysis of Surface Wave*).

Perkembangan konsep seismik untuk keperluan geoteknik mula-mula diperkenalkan oleh Terzaghi (1943) dan Hvorslev (1949) yang menyatakan prinsip-prinsip kerja gelombang permukaan. Dengan menggunakan prinsip-prinsip tersebut, Jones (1958) memulai aplikasi metode gelombang Rayleigh dengan menggunakan vibrator harmonik yang stabil pada struktur tanah dan jalan raya. Sejalan perkembangan teknologi informasi, pengujian konvensional gelombang permukaan di atas telah dikembangkan menjadi metode SASW. Metode SASW dimulai dari studi Wiliam (1981) dan Heisey (1982) yang mengembangkan metode pengukuran gelombang permukaan dengan menggunakan palu mekanik sebagai sumber pembangkit gelombang. Aplikasinya yang pertama telah dilakukan oleh Nazarian (1984) dan Nazarian & Stokoe (1984) yang

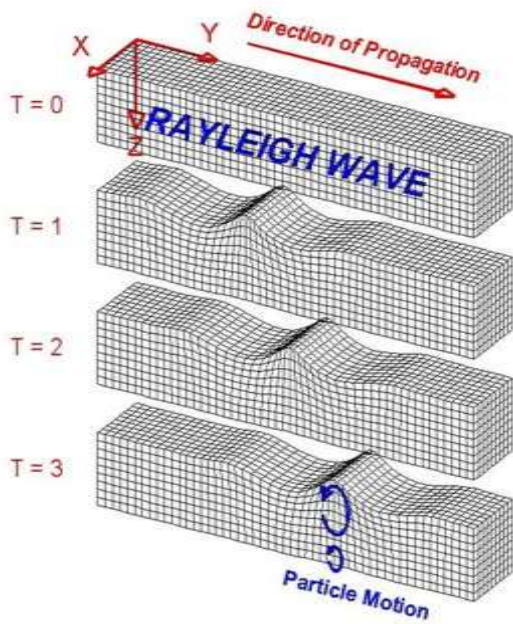
menjelaskan penggunaan SASW kepada analisis kekakuan tanah dan struktur timbunan jalan.

Penggunaan teknik SASW telah didapati berhasil untuk beberapa pengujian lapangan diantaranya studi karakteristik fondasi bangunan (Madshus & Westerdhal 1990; Stokoe et al. 1994), pengukuran lapangan nilai kekakuan tanah (Matthews et al. 1996), penilaian struktur beton (Rix et al. 1990; Cho 2002), pendeteksian lapisan pada struktur motar semen (Cho et al. 2001), penilaian kepadatan suatu struktur tanah timbunan (Kim et al. 2001) dan struktur fondasi (*ballast*) jalan kereta api (Zagyapan et al. 2002). Haupt (1977), Dravinsky (1983), Curro (1983) dan Gucunski et al. (1996, 2000) telah menunjukkan bahwa gelombang permukaan sangat sensitif kepada anomali (contohnya pengaruh keretakan dan lubang dalam struktur yang tidak homogen) yang terletak di permukaan suatu media. Untuk validasi pengukuran SASW di perkerasan jalan, Rosyidi et al. (2002, 2003, 2004) dan Rosyidi (2004) telah menjalankan pengujian lapangan di tipe perkerasan lentur dimana menghasilkan persamaan empiris dari hubungan kapasitas kekuatan tanah terhadap nilai dinamis bahan yang diukur melalui gelombang. Hasil kajiannya menunjukkan bahwa terdapat nilai korelasi positif yang tinggi dari hubungan nilai CBR terhadap nilai kecepatan gelombang geser dan modulus elastik bahan yang dihasilkan dari pengukuran SASW.

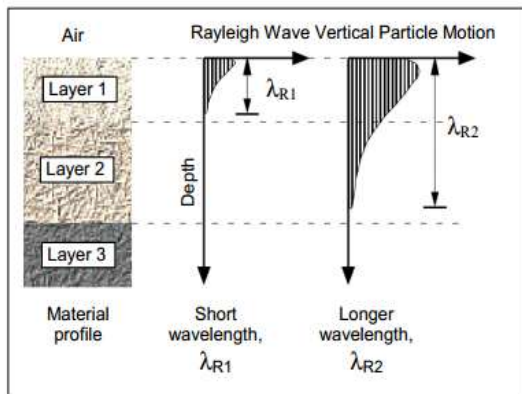
## LANDASAN TEORI

### Gelombang Seismik

Menurut Kramer (1996) penggunaan gelombang seismik dibedakan menjadi dua macam yaitu gelombang badan (primer dan sekunder) dan gelombang permukaan (gelombang rayleigh dan gelombang love). Bentuk skematik gelombang rayleigh dapat dilihat pada gambar 1 dan 2 di bawah ini.



**Gambar 1.** Bentuk perambatan gelombang Rayleigh



**Gambar 2.** Sifat gelombang Rayleigh yang merambat pada media yang berlapis

**Fungsi Spektrum dalam SASW**

Pengukuran SASW menggunakan dua sensor yaitu bagian input (masukan, sensor pertama) dan output (keluaran, sensor kedua). Persamaan yang dihasilkan oleh kedua sensor adalah sebagai berikut :

$$Z_1 = A_1(\cos\phi_1 + \sin\phi_1) \tag{1}$$

$$Z_2 = A_2(\cos\phi_2 + \sin\phi_2) \tag{2}$$

Dimana :

- $Z_{1,2}$  : displacement gelombang
- $A_{1,2}$  : amplitudo yang dihasilkan
- $\phi_{1,2}$  : fungsi sinus dan kosinus

**Kecepatan Gelombang Rayleigh ( $V_R$ )**

Metode beda fase (*phase different method*) merupakan metode yang secara umum dipakai untuk memperkirakan nilai kecepatan gelombang menggunakan waktu pergerakan gelombang. Waktu pergerakan gelombang ( $t$ ) dapat dihitung dari nilai beda fase  $\phi$  dari kedua sensor dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\phi = 2\pi f_o t \tag{3}$$

- $\phi$  : sudut fase
- $f_o$  : frekuensi gelombang (Hz)
- $t$  : waktu pergerakan gelombang (dt)

Selanjutnya jika jarak di antara dua sensor ditetapkan maka kecepatan gelombang Rayleigh ( $V_R$ ) dan panjang gelombang dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_R = \frac{d}{t} = f_o \cdot \lambda \tag{4}$$

Dimana :

- $V_R$  : kecepatan gelombang Rayleigh (m/dt)
- $D$  : jarak diantara dua sensor (m)
- $T$  : waktu perjalanan gelombang Rayleigh (dt)

Panjang gelombang Rayleigh ( $\lambda$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$\lambda = \frac{d}{\phi/2\pi} \tag{5}$$

Dimana :

- $\lambda$  : panjang gelombang Rayleigh
- $d$  : jarak diantara sensor (m)
- $\phi$  : sudut fase

**Kecepatan gelombang Geser ( $V_s$ )**

Metode inversi sederhana didasarkan pada kecepatan gelombang geser bernilai 1,1 kali kecepatan gelombang Rayleigh, sedangkan kedalaman lapisan dapat diambil nilai 0,33 kali panjang gelombang (Heisey et al, 1982).

$$V_s = 1,1V_r \tag{6}$$

$$H = 0,33\lambda \tag{7}$$

Dimana :

- $V_s$  : kecepatan gelombang geser (m/dt)
- $V_R$  : kecepatan gelombang Rayleigh

$(m/dt)$   
 H : kedalaman (m)  
 $\lambda$  : panjang gelombang (m)  
**Modulus Geser (G) dan Modulus Elastisitas (E)**

Nilai modulus geser dan modulus elastisitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Yoder & Witczak, 1975) :

$$G = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \quad (8)$$

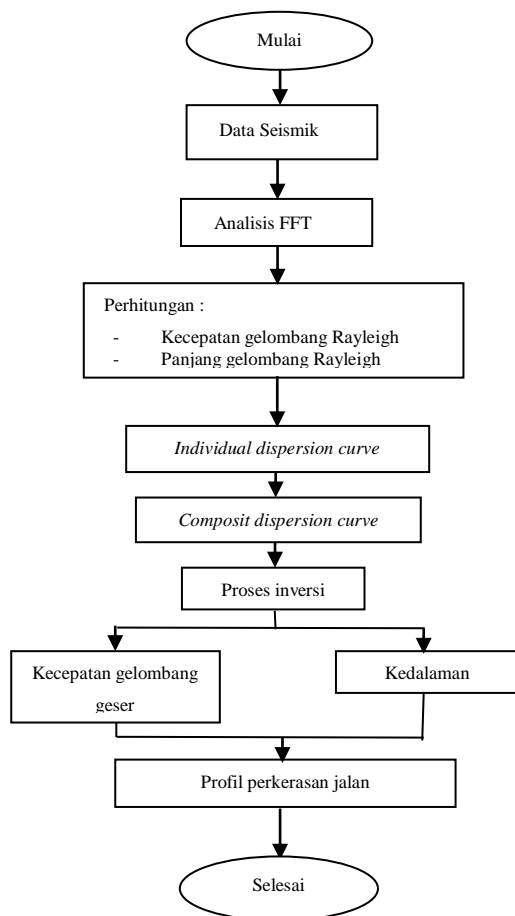
$$E = \frac{2\gamma}{g} V_s^2 (1 + \mu) \quad (9)$$

Dimana :

- G : modulus geser (Mpa)
- E : modulus elastisitas (Mpa)
- $V_s$  : Kecepatan gelombang (m/dt)
- g : percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)
- $\mu$  : angka poisson material

**METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian yang dilakukan mengikuti langkah-langkah bagan alir di bawah ini.



**Gambar 3.** Bagan alir penelitian

1. Data Seismik

Data yang dipergunakan merupakan data sekunder. Data sekunder diambil dari Universitas Kebangsaan Malaysia (UKM) yang merupakan hasil pengujian dan pengukuran data lapangan oleh Rosyidi et al (2002) dan Rosyidi (2004) yang terdiri dari :

- a. Data gelombang digital yang ditunjukkan dalam data amplitudo, percepatan dan domain waktu dalam bentuk data gelombang seismik yang diambil dari jalan raya jenis perkerasan lentur yang merupakan jalan raya baru yang belum dibuka untuk lalu lintas sehingga tidak ada keretakan yang signifikan pada struktur perkerasannya, jalan lama merupakan jalan yang telah dipakai untuk lalu lintas dan jalan yang telah dioverlay.
- b. Jarak di antara sensor, yang terdiri dari 5 cm, 10 cm, 40 cm dan 80 cm
- c. Jarak diantara sumber gelombang dengan sensor pertama sama dengan jarak diantara sensor.

2. Analisis Data FFT (*Fast Fourier Transform*)

Untuk mempermudah proses analisis data digunakan software dBFA 32 dalam 01dB dari Perancis. Aalat penganalisis dinamik gelombang digunakan untuk menerima, mencatat dan menganalisis sinyal gelombang Rayleigh melalui pendeteksian dua sensor di lokasi pengambilan data. Signal pergerakan gelombang masih diterima dalam domain waktu yang selanjutnya dengan menggunakan metode FFT, ditransformasikan pada bentuk domain frekuensi secara otomatis yang ditampilkan dalam simulasi spektrum tenaga auto (*auto power spectrum*), spektrum tenaga silang (*cross power spectrum*), fungsi pindahan (*transfer function*), dan fungsi koheren (*coherence function*) seperti yang diuraikan oleh Rosyidi (2004).

3. Kurva penyebaran kecepatan fase

Kurva penyebaran kecepatan fase merupakan plot kecepatan fase melawan perubahan nilai frekuensi. Kurva ini mempunyai bagian penting pada lapisan

bawah permukaan dan ciri teknikalnya yang berguna untuk proses inversi profil suatu struktur. Proses ini dibagi menjadi dua bagian yaitu pertama proses penyembunyian data (*masking proses*), kedua proses pembentukan kurva sebaran individu dan gabungan. Kurva eksperimen gabungan sebaiknya memiliki 20 hingga 50 titik data untuk proses inversi yang baik (joh, 1996). Oleh karena itu kurva eksperimen gabungan harus disusun menjadi kurva eksperimen rata rata. Dalam penelitian ini, pembuatan kurva eksperimen rata rata dibuat berdasarkan metode yang diperkenalkan oleh joh (1996) yaitu kurva rata-rata global (*global average dispersion curve*) dan kurva dispersi rata-rata bergerak (*array average dispersion curve*). Asas pembentukan motedo ini adalah rata-rata bergerak yang telah digunakan untuk pemrosesan geofisik. Program yang digunakan adalah WinSASW versi 2.0.1. program ini menjalankan tahap analisis data SASW untuk proses penyembunyian dan penyusunan kurva penyebaran kecepatan gelombang secara otomatis.

4. Proses Inversi

Proses inversi merupakan proses perhitungan profil tebal lapisan struktur perkerasan dan kecepatan gelombang geser dari kurva dispersi kecepatan gelombang Rayleigh. Dalam inversi ini digunakan metode *simple inversion method*.

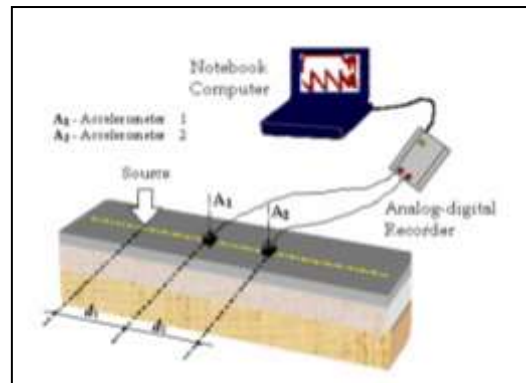
5. Profil Akhir

Pada tahap ini merupakan proses perhitungan dan penentuan tebal profil lapisan struktur perkerasan yang terdiri dari lapisan pondasi bawah (*subbase course*), lapis pondasi atas (*base course*) dan lapis permukaan (*surface course*).

**SET UP PENGUJIAN**

Bola baja bulat dengan berat 5 sampai 15 gr dapat digunakan sebagai sumber gelombang permukaan dengan menjatuhkan pada ketinggian tertentu. Gelombang ini akan terdeteksi dan terekam menggunakan dua buah sensor kemudian akan di transfer ke notebook untuk kemudian dapat dilakukan pemrosesan (gambar 4). Pengujian ini

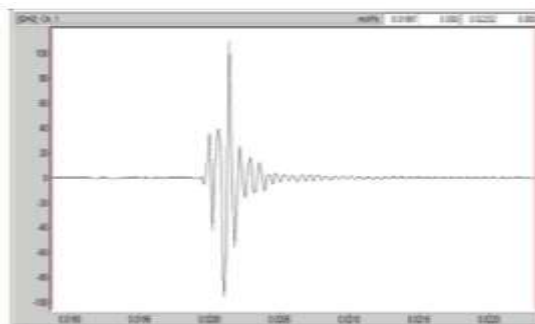
dilakukan untuk beberapa kali dengan jarak antar sensor yang berbeda (5, 10, 40 dan 80).



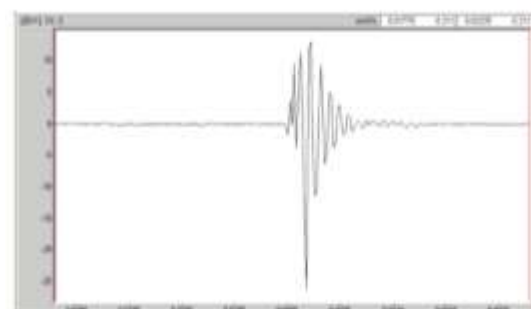
**Gambar 4.** Set Up pengujian

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Data yang dianalisis merupakan data sekunder yang diperoleh dari Universitas Kebangsaan Malaysia yang merupakan hasil pengujian dan pengukuran data di lapangan oleh Rosyidi et al (2002) dan Rosyidi (2004). Dalam analisis SASW, gelombang yang dihasilkan dari sumber mekanik dalam perambatan berbentuk transient, yang bentuk gelombangnya tidak teratur dan semakin lama amplitudo gelombangnya akan berkurang secara cepat (gambar 5).

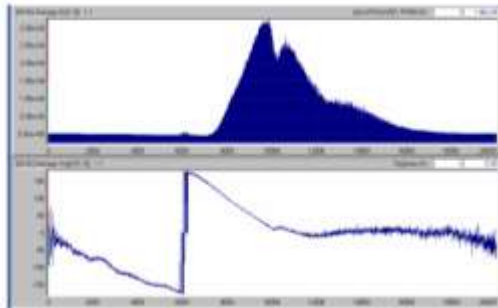


**Gambar 5.** Data analog gelombang yang diterima oleh sensor 1



**Gambar 6.** Data analog gelombang yang diterima oleh sensor 2

Selanjutnya data digital gelombang ditransformasikan kepada domain frekuensi menggunakan metode FFT (*Fast Fourier Transform*). Untuk memperlancar kegiatan transformasi ini software dBFA 32 akan digunakan sebagai perangkat lunak pengotomatik analisis data. Setelah dianalisis dalam domain frekuensi, data gelombang ditampilkan dalam fungsi spektrum tenaga auto (*auto power*), fungsi perpindahan (*transfer function*) dan fungsi koheren (*coherence function*). Dari spektrum koheren akan diperoleh wilayah frekuensi yang menunjukkan sinyal yang baik, sehingga proses penyaringan (*filtering*) dan penentuan rentang frekuensi reaksi gelombang dilaksanakan dalam tahap ini (gambar 7 dan 8).



**Gambar 7.** Hasil analisis data gelombang dalam spektrum *transfer function* (beda fase dan frekuensi)



**Gambar 8.** Hasil analisis data gelombang dalam spektrum *coherence function* (magnitudo dan frekuensi).

Apabila rentang frekuensi dapat ditentukan, melalui spektrum fungsi pindahan, data beda fase bisa diturunkan dalam bentuk spektrum terbuka.

Kurva eksperimen individu digabung menjadi kurva eksperimen gabungan (*composite dispersion curve*) yang dijelaskan dalam Gambar 9. Kurva eksperimen gabungan sebaiknya memiliki 20 hingga 50 titik data. Oleh karena itu kurva

eksperimen gabungan harus disusun menjadi kurva eksperimen rata rata yang ditunjukkan oleh Gambar 10.

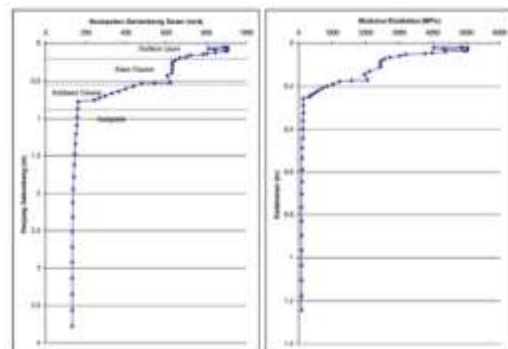


**Gambar 9.** Kurva Eksperimen Gabungan



**Gambar 10.** Kurva eksperimen rata-rata

Proses inversi dilakukan dengan metode sederhana (*simple inversion method*) yang direkomendasikan oleh Richart et al. (1972). Proses ini menghitung modulus elastisitas dari data kecepatan gelombang Rayleigh dengan mengasumsikan kepadatan bahan (*mass density*) dan angka Poisson untuk setiap bahan perkerasan jalan. Profil perkerasan jalan dapat dihasilkan dengan parameter modulus elastisitas dan kedalaman. Contoh profil perkerasan hasil analisis menggunakan metode SASW yang ditunjukkan oleh Gambar 11.



**Gambar 11.** Gabungan antara kecepatan gelombang, modulus elastisitas terhadap kedalaman lapisan perkerasan

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kecepatan gelombang dan rata rata di Jalan Putra Jaya adalah 685,5146 m/dt, jalan Pusat kesehatan 832,0904 m/dt, dan di jalan Main gate UKM 777,1562 m/dt.
2. Tebal lapis perkerasan :
  - a. Di Jalan Putra Jaya adalah surface course 0,06 m.
  - b. Di jalan Pusat kesehatan surface course 0,066 m.
  - c. Di jalan Main gate UKM surface course 0,0613 m.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Cho, Y.S dan Lin, F-B, 2001, Spectral analysis of surface wave response of multy layer thin cement mortar slab structure with finite element thickness, NDT International 34 (2001), Elsevier Science, pp. 115-122
- Cho, Y.S. 2002. NDT Response of spectral analysis of surface wave method to multilayer thin high strength concrete structure, Ultrasonic 40: 227-230.
- Curro, J.R. 1983. Cavity detection and delineation research. Technical Report GL-83-1.U.S. Army Waterways Experiment Station.
- Dravinsky, M. 1983. Ground motion amplification due to elastic inclusions in a halfspace. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 11:313-335.
- Gucunski, N. Ganji, V. & Maher, M.H. 1996. Effect of soil non homogeneity on SASW testing. Geotechnical Special Publication, 58: 1083-1097
- Haupt, A.W. 1977. Surface-waves in non homogeneous half-space. Proc. of the Conference on Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics. Vol. 1, hlm. 335-367.
- Heisey, J. S., Stokoe II, K. H., and Meyer, A.H. (1982). "Moduli of Pavement System from Spectral Analysis of Surface Waves". Transportation Research Record 852, p. 22-31.
- 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): 1-21.
- Joh, S.H. 1996. Advance in interpretation & analysis technique for spectral analysis of surface wave (SASW) measurements. Disertasi Ph.D. The University of Texas at Austin.
- Kim, D.-S., Shin, M.-K. & Park H.C. 2001. Evaluation of density in layer compaction using SASW method, Soil Dynamic & Earthquake Engineering 21 : 39-46
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical earthquake engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 653 pp.
- Madshus, C. & Westerdahl, H. 1990. Surface wave measurements for construction control and maintenance planning of roads and airfields. Proc. of 3rd. Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads and Airfields, hlm. 233-243.
- Matthews, M.C. Hope, V.S. & Clayton, C.R.I. 1996. The geotechnical value of ground stiffness determined using seismic methods. Proc. of 30th Annual Conference of the Engineering Group of the Geological Society, hlm. 1-13.
- Nazarian, S. and Stokoe II, K. H. (1984). "In Situ Determination of Elastic Moduli of Pavement Systems by Spectral-Analysis-Of-Surface-Wave Method (Theoretical Aspects)". Research Report 437-2, Bureau of Engineering Research. Center of Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Rix, G.J., Bay, J.A. & Stokoe II, K.H. 1990. Assessing in situ stiffness of curing Portland cement concrete with seismic tests. Transportation Research Record 1284: 8-15.
- Rosyidi, S.A.P.J.N.N., Nayan, K.A.M, Taha, M.R. & Mustafa, M.M. 2002. Pengukuran sifat dinamik perkerasan lentur menggunakan metode Spectral-Analysis-of Surface-Wave SASW).

- Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi V, hlm 1-12.
- Rosyidi, S.A.P.J.N.N., & Taha, M.R. 2003. Use the shear wave velocity for predicting the stiffness of asphalt layer of pavement profile. Konferensi Nasional Teknik Jalan ke-7, Jakarta.
- Rosyidi, S.A.P.J.N.N. & Taha, M.R. 2004. Measurement of Pavement Moduli using Simple Surface Wave Propagation Technique. Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi VII, hlm 1-10.
- Rosyidi, S.A.P.J.N.N. 2004. Pengukuran Kekakuan Dinamik Turapan Menggunakan SASW. Tesis Master. Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Stokoe II, K. H., Wright, S. G., Bay, J. A., and Roesset, J. M. (1994). "Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. Geotechnical Characterization of Sites". R.D. Wood, Ed., Oxford and IBH Pub.Co., New Delhi, India, p. 15-26.
- Terzaghi, K. 1943. Theoretical soil mechanics. New York: John & Wiley Sons.
- Zagaypan, M. and Fairfield, C. A. (2002). "Continuous Surface Wave and Impact Methods of Measuring the Stiffness and Density of Railway Ballast". NDT & E International, Vol. 35, p.75-81