

# PEMETAAN DAYA DUKUNG TANAH DAN DISKONTINUITAS STRUKTUR TANAH DASAR MENGGUNAKAN METODE *MULTI-CHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES* (MASW)

**Sri Atmaja P. Rosyidi**

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jalan Lingkar Selatan, Tamantirto, 55183, Telp 0274 387656(110)  
Email: atmaja\_sri@umy.ac.id

## Abstrak

*Makalah ini mendeskripsikan penggunaan metode Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW) untuk mendeteksi kapasitas daya dukung tanah dan memetakan diskontinuitas yang terjadi pada sub-permukaan tanah dasar yang dipersiapkan untuk struktur bangunan jalan dan terowongan. Metode MASW menggunakan peralatan seismograf untuk merekam perambatan gelombang seismik yang dihasilkan dari sumber gelombang mekanik yang digunakan di atas permukaan tanah. Rambatan gelombang terekam melalui 24-sensor yang saling berhubung dan diatur sedemikian sehingga dalam suatu garis lurus imajiner. Dari data rekaman yang diperoleh, suatu operasi spektrum analisis respon frekuensi berbasis Fourier dijalankan untuk mendapatkan data beda fase terhadap frekuensinya yang digunakan untuk mendapatkan grafik sebaran kecepatan gelombang permukaan. Tahap akhir dari metode ini adalah melakukan inversi terhadap grafik sebaran kecepatan gelombang permukaan untuk menghasilkan profil kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman tanah. Berdasarkan profil ini, dapat diperoleh nilai kekuatan daya dukung tanahnya melalui persamaan korelasi empirik dan modulus geser. Selain itu, penggabungan beberapa profil tanah tersebut dapat diperoleh analisis tomografi dalam 2 dimensi yang dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan diskontinuitas, cavities dan sinkholes yang terdapat pada lapisan sub-permukaan. Beberapa contoh kasus penggunaan metode MASW untuk memperoleh daya dukung tanah dan diskontinuitas struktur sub-permukaan disertakan dalam makalah ini. Hasil yang ditunjukkan menguatkan kesimpulan bahwa metode MASW merupakan salah satu metode yang berpotensi untuk investigasi sub-permukaan yang akurat dan teliti dalam pembangunan proyek-proyek jalan dan terowongan.*

**Kata Kunci:** MASW, kecepatan gelombang geser, daya dukung tanah, diskontinuitas, sub

## Pendahuluan

Penyelidikan lapangan dengan menggunakan metode seismik non-destruktif dalam bidang geoteknik merupakan salah satu penyelidikan lapangan yang sering dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai struktur bawah permukaan. Salah satu informasi struktur bawah permukaan yang penting untuk diketahui adalah sifat kekakuan tanah (*soil stiffness*). Dengan metode seismik, sifat kekakuan tanah dapat diperoleh dengan mengukur kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) suatu material. Metode seismik berdasarkan pada analisis perambatan gelombang permukaan merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk memperoleh nilai kecepatan gelombang geser. Gelombang permukaan atau gelombang Rayleigh mempunyai total energi perambatan yang paling besar yaitu sekitar 67% dibandingkan dengan gelombang-gelombang yang lain seperti gelombang geser (*S wave*) dan gelombang badan (*P wave*). Kecepatan gelombang geser merupakan salah satu parameter penting yang digunakan dalam pemodelan dinamika tanah khususnya pada kondisi beban siklik atau berulang. Berdasarkan nilai  $V_s$  ini selanjutnya dapat diturunkan beberapa parameter bahan dinamik seperti modulus geser dan rasio pelemahan (*damping ratio*) tanah.

Salah satu metode analisis yang dikembangkan dari teknik seismik adalah penggunaan multi sensor dalam pengukuran gelombang permukaan. Teknik ini selanjutnya dikenal sebagai analisis multi-sensor gelombang permukaan (*multi-channel analysis of surface wave*) atau MASW. Teknik MASW ini masih relatif baru dan dikembangkan pertama kali oleh Park et al. (1999a,b,c) dari Kansas Geological Survey (KGS). Penggunaannya dalam investigasi geoteknik telah dilakukan oleh beberapa penelitian seperti Miller, et al (1999) untuk pemetaan batuan bawah tanah (*bedrock*), Xia et al. (1999a) untuk mengestimasi profil sub-permukaan dengan inversi gelombang Rayleigh, Xia et al. (1999b) untuk menginvestigasi sedimen tak terkonsolidasi, Ryden et al. (2004) untuk menentukan profil kekakuan perkerasan jalan, Kaufmann et al. (2005) untuk menginvestigasi stratifikasi dasar perairan laut yang dangkal, dan Xia et al. (2006) untuk menentukan gelombang permukaan berfrekuensi tinggi dalam analisis spektrum profil tak beratur.

Makalah ini bertujuan untuk menjelaskan aplikasi metode *Multi-channel Analysis of Surface Waves* (MASW) dalam investigasi sub-permukaan untuk mendeteksi kapasitas daya dukung tanah dan memetakan

diskontinuitas yang terjadi pada sub-permukaan tanah dasar yang dipersiapkan untuk struktur bangunan jalan dan terowongan. Beberapa hasil pengukuran MASW untuk mendapatkan daya dukung tanah dan memetakan diskontinuitas diberikan dalam makalah ini.

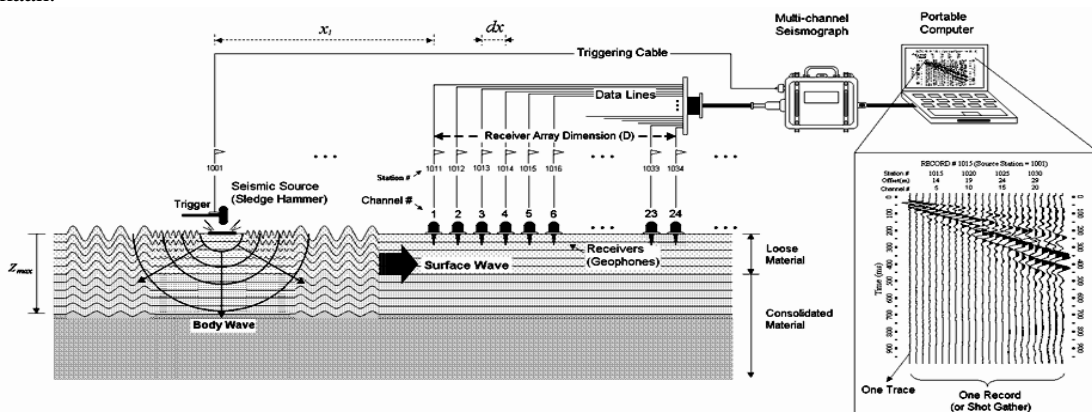
**Metode Pengujian MASW**

Dalam penyelidikan dengan metode MASW, ada beberapa jenis sumber getaran aktif yang dapat digunakan, antara lain palu dan alat getar (vibroises). Palu dengan berat 20 lb atau sekitar 23 kg merupakan jenis sumber getaran yang paling efisien dan efektif untuk digunakan serta pelaksanaannya di lapangan. Geofon (receiver/geophone) yang berfrekuensi 4.5 Hz sebaiknya digunakan agar gelombang Rayleigh, dapat terdeteksi dan terekam dengan baik. Gelombang Rayleigh merupakan gelombang permukaan yang dideteksi dan dianalisis dalam metode MASW ini. Karakteristik dari gelombang ini yaitu berfrekuensi rendah, kecepatan gelombang relatif rendah dan amplituda yang tinggi.

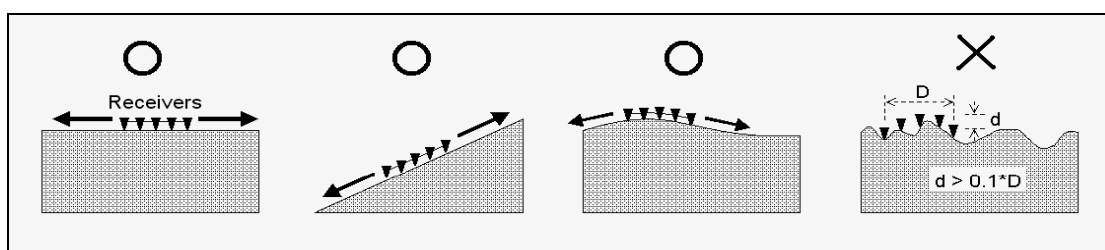
Untuk perekaman data seismik dengan metode ini, terdapat beberapa parameter dalam konfigurasi lapangan yang harus diperhatikan dan ditentukan dengan sesuai, agar diperoleh data seismik yang berkualitas bagus dan jelas. Jarak geofon dengan sumber getaran merupakan salah satunya. Jika jarak geofon yang paling dekat ( $x_1$ ) dengan sumber getaran terlalu dekat, *near field effect* akan terjadi. Karena gelombang Rayleigh akan menjadi stabil dan planar setelah merambat dalam jarak tertentu dari sumber getaran. Untuk menghindari hal itu, suatu asumsi umum untuk  $x_1$  diberikan yaitu sebesar 20% dari panjang bentangan geofon (Xia et al, 2006). Begitu juga, untuk jarak geofon yang paling jauh dengan sumber getaran, karena pada jarak yang jauh, gelombang badan dan mode yang lebih tinggi (*far field effect*) menjadi lebih dominan daripada mode dasar (gelombang Rayleigh). Pada umumnya jarak geofon yang paling jauh disesuaikan dengan kedalaman maksimum pengujian yang diinginkan.

Untuk jarak antara geofon, spasi jarak minimum sebaiknya sebanding dengan panjang gelombang minimum ( $\lambda_{min}$ ) yaitu kedalaman observasi minimum yang diharapkan. Jarak antara geofon yang terlalu jauh akan mengakibatkan munculnya efek gelombang yang lain (*spatial aliasing problem*) (Park et al., 2001). Pada Gambar 1 dapat dilihat konfigurasi lapangan untuk metode MASW dengan lebih jelas. Beberapa pukulan dilakukan untuk mendapatkan beberapa data seismik dalam satu garis survei. Hal ini dilakukan dengan memindahkan posisi sumber getaran (dSRC) yaitu sebesar 1 hingga 12 kali spasi jarak geofon. Dan yang paling umum digunakan untuk geofon berjumlah 24 adalah sebesar 1 kali spasi jarak geofon (1dx).

Kondisi topografi untuk lintasan survei juga menjadi salah satu hal yang harus diperhatikan, karena penyelidikan gelombang permukaan dengan metode ini sebaiknya dilakukan pada daerah yang cukup datar. Pada Gambar 1 dapat dilihat bagaimana arah lintasan survei pada berbagai kondisi topografi. Perbedaan tinggi (arah vertikal) dari satu geofon ke geofon yang lain tidak boleh lebih dari 10% panjang bentangan geofon, seperti terlihat pada gambar ke empat. Hal ini akan mengakibatkan gangguan yang signifikan pada perambatan gelombang permukaan.



**Gambar 1.** Konfigurasi penentuan letak sensor dalam MASW



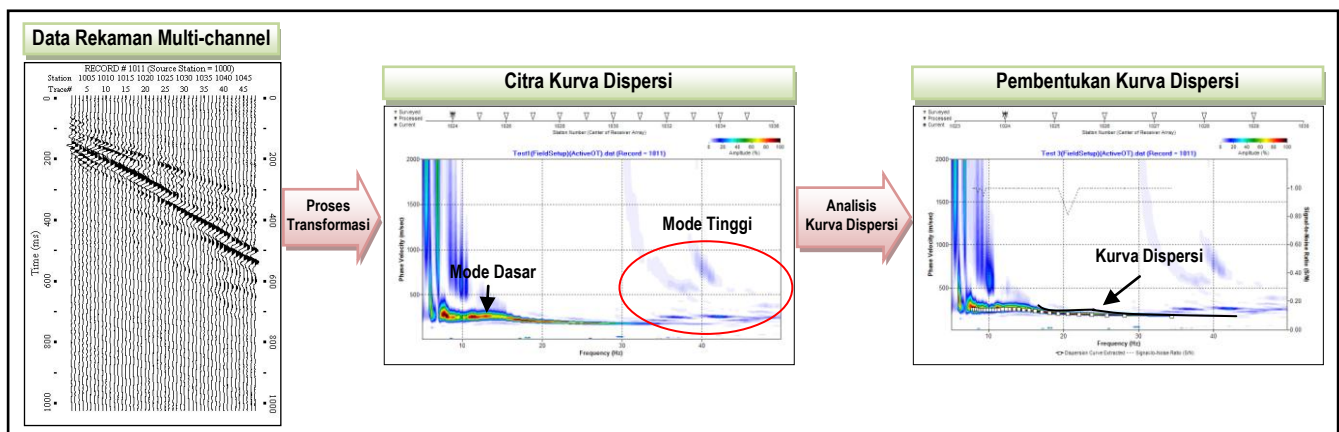
**Gambar 1.** Arah Lintasan Survei pada Kondisi Topografi yang Bervariasi

### Metode Pemrosesan Data menggunakan Metode MASW

Dalam metode MASW, data seismik yang telah diukur dan direkam oleh seismograf atau sering disebut sebagai data rekaman multi-channel, selanjutnya akan diproses serta dianalisis. Terdapat dua tahapan untuk mengolah dan menganalisis data seismik tersebut sehingga pada akhirnya akan diperoleh satu profil material bawah permukaan (kecepatan geser tanah terhadap kedalaman). Kedua tahapan itu adalah tahapan pembentukan kurva dispersi dan proses inversi terhadap kurva dispersi untuk mendapatkan profil material bawah permukaan.

Dengan metode MASW, suatu citra dari kurva dispersi yang memperlihatkan energi (amplitudo) dari sinyal-sinyal gelombang yang terekam dapat dibentuk langsung dari data rekaman multi-channel. Hal ini dapat dilakukan dengan suatu metode yang telah dikembangkan oleh Park et al (1998), yaitu metode pergeseran fase (*phase-shift method*). Data rekaman multi-channel berdomain waktu-jarak ditransformasi ke dalam domain frekuensi-kecepatan fase-amplitudo. Proses pertama yaitu dengan menggunakan *Fast Fourier Transformation (FFT)* dan selanjutnya proses transformasi integral yang menghasilkan citra dari kurva dispersi, seperti terlihat pada

Gambar 2. Dari citra kurva dispersi, jenis-jenis gelombang dapat teridentifikasi dengan lebih jelas sehingga penentuan mode dasar untuk membentuk kurva dispersi dapat dilakukan dengan lebih akurat. Jika kurva dispersi dapat diperoleh dengan akurat, maka tingkat ketelitian profil kecepatan gelombang geser dari hasil inversi juga akan lebih tepat.



**Gambar 2.** Proses Pembentukan Kurva Dispersi

Suatu model lapisan material bumi pertama-tama ditentukan dalam proses inversi ini. Kurva dispersi dari model lapisan tersebut kemudian dihitung dengan menggunakan metode Knopoff (Xia et al, 1999a). Kurva dispersi hasil pengukuran dibandingkan dan dicocokkan dengan kurva hasil perhitungan dari model lapisan yang telah ditentukan di awal proses. Proses iterasi dilakukan dan metode *least square* digunakan sehingga akhirnya diperoleh satu profil lapisan material perkiraan yang paling sesuai. Matriks Jacobian digunakan untuk mengukur kepekaan perubahan nilai parameter-parameter kecepatan geser ( $v_s$ ), kecepatan gelombang tekan ( $v_p$ ), berat jenis ( $\rho$ ) dan ketebalan ( $h$ ) dari model lapisan. Dengan menerapkan Metode *Levenberg-Marquardt (L-M)* dan *Singular-Value Decomposition (SVD)* dalam matriks Jacobian, kestabilan dan kecepatan proses inversi akan diperoleh (Xia et al, 1999a). Setelah proses inversi berakhir dan profil satu dimensi dari masing-masing data rekaman multi-channel dihasilkan, profil dua dimensi kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman kemudian dapat dibentuk dengan melakukan korelasi terhadap profil-profil satu dimensi menggunakan teknik *contouring grids* (Xia et al, 2000).

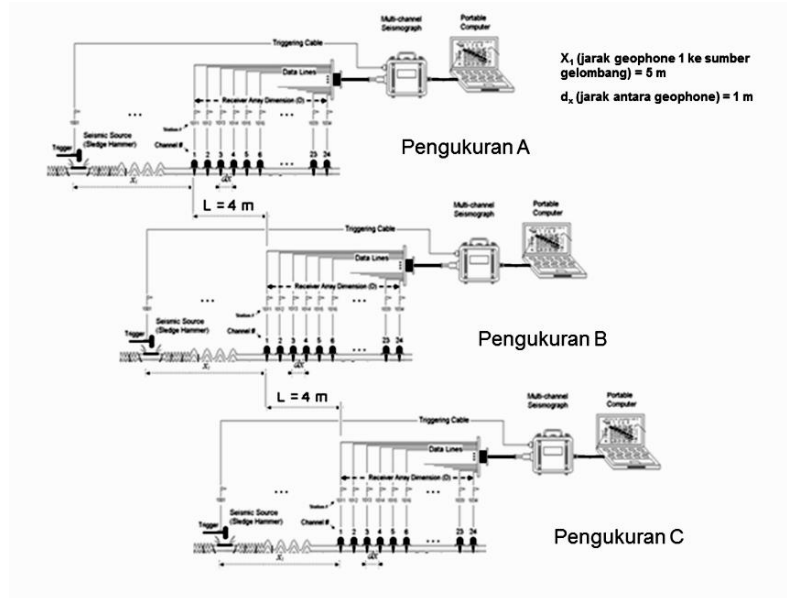
### Hasil dan Pembahasan

#### 1. Pengukuran MASW pada Profil Tanah Deposit di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

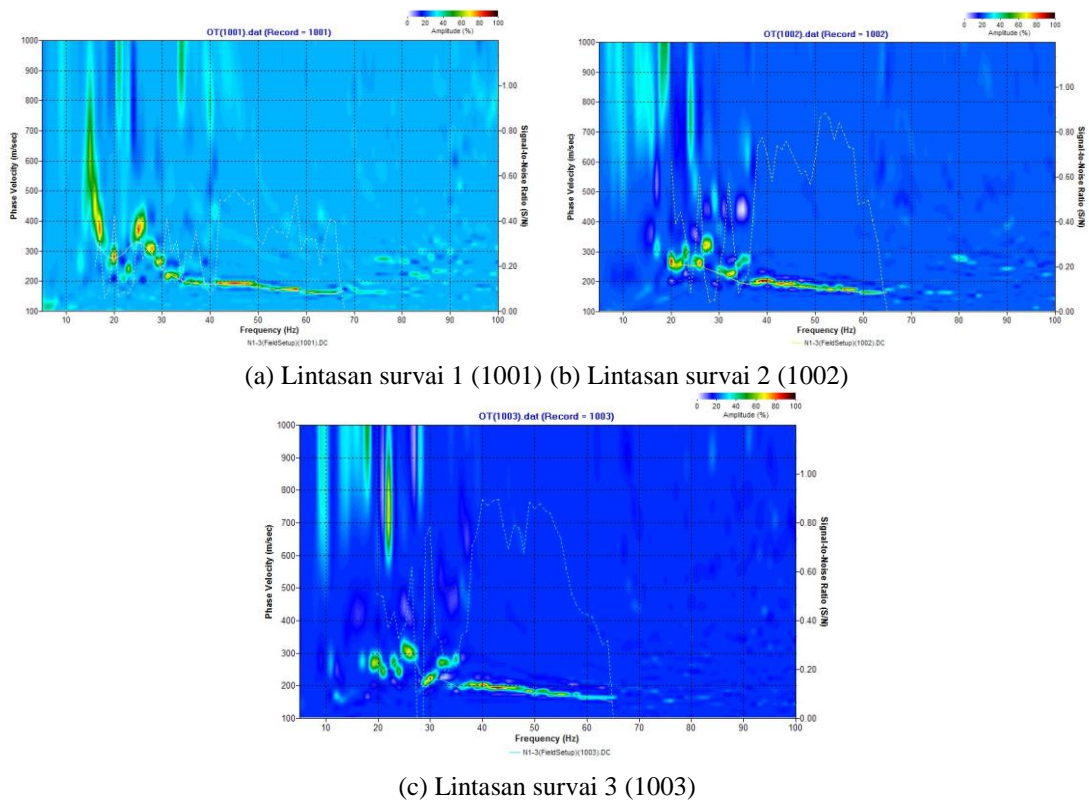
Profil 1-D kecepatan gelombang geser ditentukan dari susunan satu lintasan pengujian MASW yang mewakili sifat bahan sepanjang lintasan survai. Oleh sebab itu, untuk mengestimasi profil 2-D diperlukan beberapa rekaman data seismik dalam satu lintasan survey dengan melakukan pemindahan sumber getaran berikut geofonnya searah lintasan survai. Untuk memperoleh data seismik yang berkualitas baik, selain peralatan yang memadai, beberapa parameter dalam konfigurasi lapangan juga perlu diperhatikan dan ditentukan dengan benar (Gambar 4).

Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4, bahwa jarak antar sensor ditentukan sebesar 1 m dengan jarak sumber gelombang kepada sensor 1 adalah 5 m. Konfigurasi jarak ini ditentukan untuk mendapatkan rekaman data hingga kedalaman sekitar 10 m. Setelah rekaman data seismik kita peroleh, kemudian terdapat beberapa tahapan pemrosesan dan analisis data seismik, seperti dapat dilihat yang dijelaskan dalam metode analisis data MASW di atas.

Gambar 5 menunjukkan contoh hasil perhitungan untuk kurva dispersif 2-D untuk pengukuran MASW di ketiga lokasi penelitian. Dalam studi ini, tiga lokasi dipilih untuk dikaji profil 2-D kecepatan gelombang geser dengan jarak total lintasan survai yang ditentukan sepanjang 10 m, sehingga diperlukan 3 pengukuran MASW pada setiap lokasi. Jarak pusat lintasan (*center line*) dalam satu lokasi adalah 5 m. Dengan demikian, setiap lokasi telah diperoleh tiga buah kurva dispersif yang merepresentasikan kondisi sub-permukaan pada lokasi penelitian yang diobservasi.



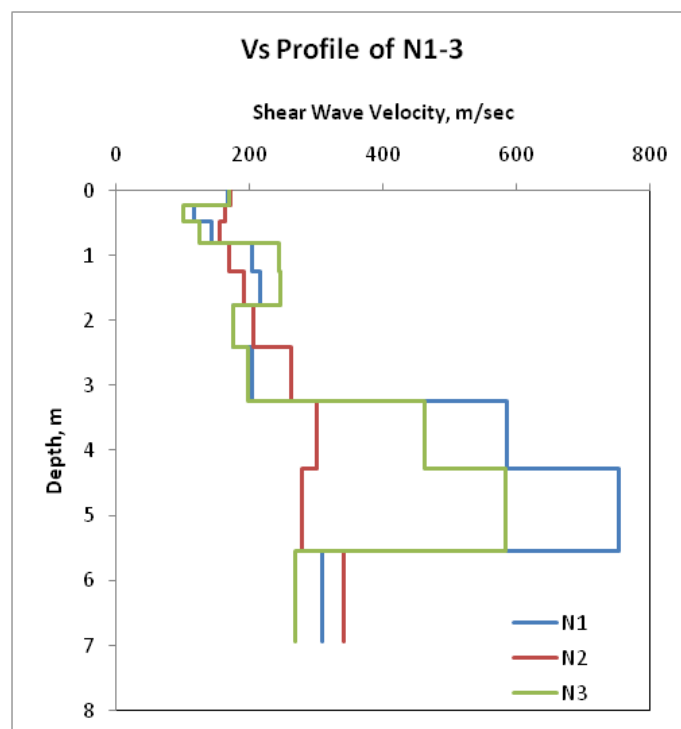
**Gambar 4.** Konfigurasi lapangan untuk mendapatkan profil 2-D untuk jarak antar sensor 1 m dan jarak sumber gelombang ke sensor 1 = 5 m



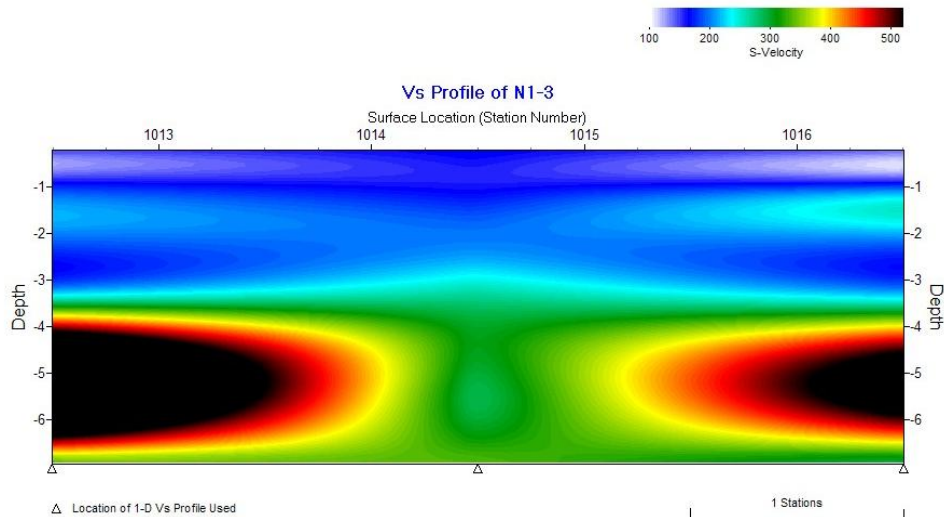
**Gambar 5.** Kurva dispersif untuk contoh hasil pengukuran pada lokasi pertama kode Utara (N)

Hasil kurva dispersif untuk lokasi pertama, Utara (N) ditunjukkan dalam Gambar 4. Dari gambar tersebut diperoleh informasi bahwa distribusi energi kurva dispersif kecepatan fase tergolong dalam pola kurva dispersif

normal dimana lapisan permukaan tanah merupakan media berlapis yang nilai kekakuan lapisan semakin ke bawah (penetrasi kedalaman), nilai kekakuan bahan relatif lebih tinggi. Dalam pola dispersif normal ini, mode fundamental terlihat mendominasi kurva dispersif fase dibandingkan dengan mode tinggi. Hal ini terlihat dari distribusi energi pada frekuensi yang rendah. Meskipun demikian, terlihat pada frekuensi 22 – 35 pada lintasan 1001 dan 1002, mode tinggi sedikit mendominasi pada kurva dispersif. Hal ini disebabkan oleh kemungkinan adanya lapisan tanah keras dengan ketebalan rendah pada yang berada pada lapisan dalam yang terjepit (diantara) lapisan dengan kekakuan yang lebih rendah. Berdasarkan informasi kurva dispersif 2-D tersebut, seterusnya dilakukan analisis inversi untuk mendapatkan beberapa profil satu dimensi (1-D) dan profil dua dimensi (2-D) kecepatan gelombang geser tanah dari setiap lintasan pada masing-masing lokasi. Proses inversi kurva dispersif eksperimen dijalankan menggunakan penyelesaian kedepan masalah perambatan gelombang Rayleigh (*the solution of the forward problem of Rayleigh wave propagation*) dalam media berlapis. Proses inversi dijalankan menggunakan software *SeisSurf*. Analisis inversi yang dijalankan hanya mempertimbangkan mode fundamental perambatan gelombang permukaan saja (seperti terlihat melalui energi dominan dalam kurva dispersif). Mode tinggi hanya dominan pada frekuensi yang lebih tinggi dari mode fundamen. Gambar 6 memperlihatkan profil-profil 1-D kecepatan gelombang geser tanah pada ketiga lokasi. Penampang 2-D untuk ketiga lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 7.



**Gambar 6.** Profil akhir kecepatan gelombang geser dan kedalaman untuk lokasi pertama kode utara

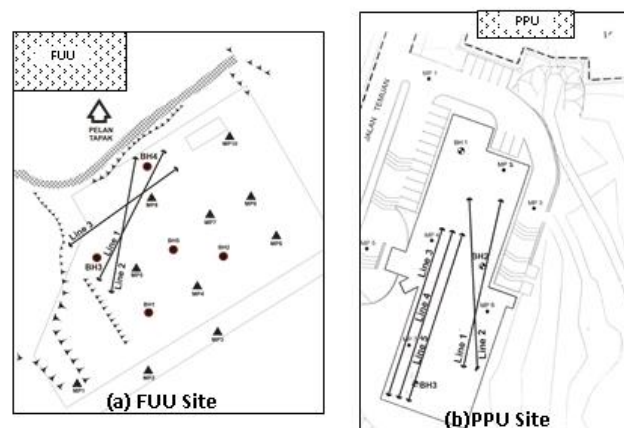


**Gambar 7.** Profil akhir 2-D untuk lokasi pertama N

Pada profil 2-D (Gambar 7), terdapat lapisan tanah keras pada kedalaman 5 hingga 6 meter. Lapisan ini terletak diantara lapisan lunak. Lapisan keras ini dapat dikorelasikan berdasarkan lokasi borehole yang berdekatan dengan lokasi pengujian MASW. Berdasarkan data litologi dari pengeboran pada titik tersebut (BH 5), diperoleh informasi bahwa pada kedalaman tersebut terdapat lapisan batu pasir yang terletak diantara lapisan pasir halus hingga kasar.

## 2. Pengukuran MASW pada Profil Tanah Sedimen di the National University of Malaysia

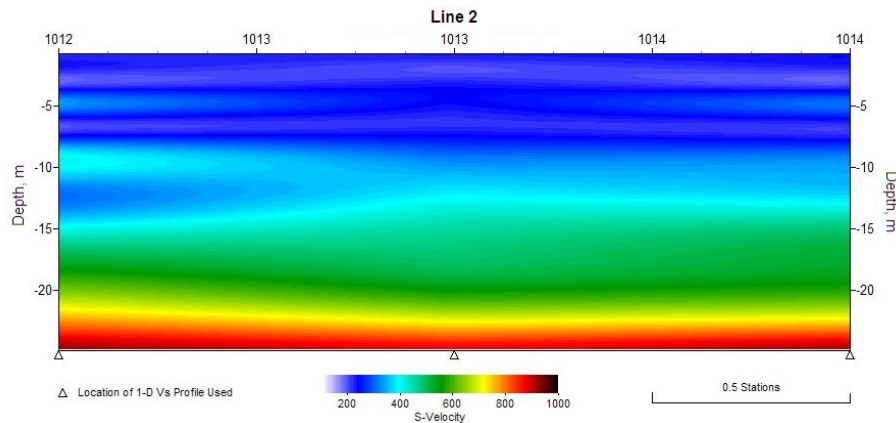
Lokasi kedua untuk kasus aplikasi MASW dilaksanakan di the National University of Malaysia (UKM). Pengukuran MASW dilakukan untuk beberapa garis pengukuran yang terletak pada lokasi yang berdekatan dengan the Faculty of Law (FUU) dan Center for General Study (PPU) Kampus UKM (Gambar 8). Kondisi topografi pada lokasi pengukuran merupakan dataran rendah dengan sedikit perbukitan. Dari data geologi, ditunjukkan bahwa lokasi studi terletak pada batuan meta-sediment yang merupakan bagian dari Kenny Hill Formation. Kenny Hill Formation terdiri dari formasi batuan inter-bedded sandstones dan shale of Upper Silurian-Devonian age.



**Gambar 8.** Peta lokasi pengukuran MASW di Kampus UKM

Contoh hasil pengukuran MASW untuk profil kecepatan gelombang geser dan kedalaman 1 D dan 2 D diberikan dalam Gambar 9.



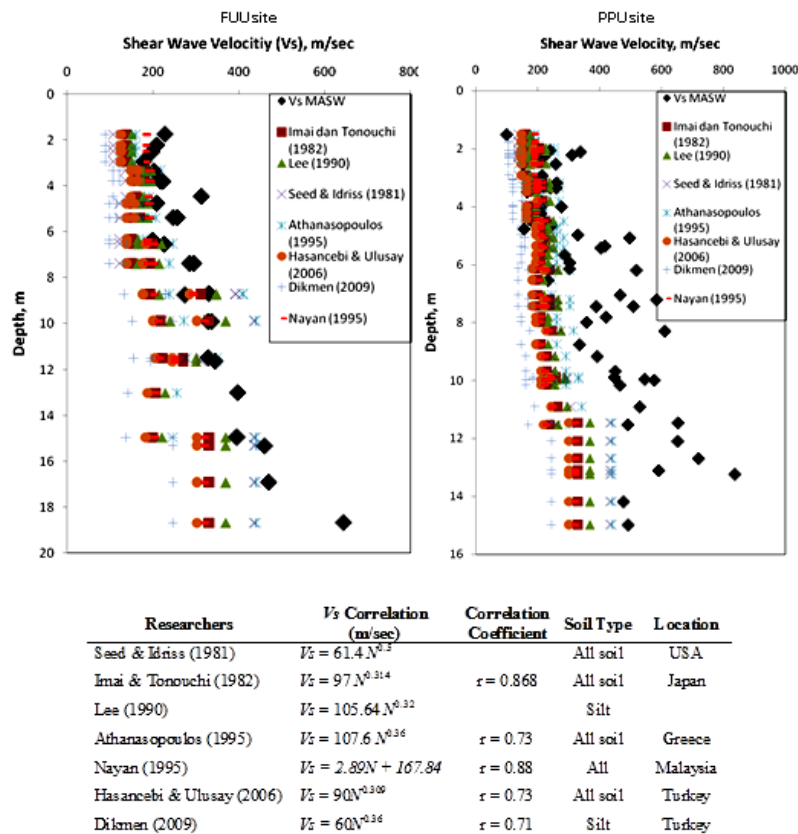


**Gambar 9.** Profil akhir 2-D dari pengukuran MASW di Kampus UKM

Tabel 1 menunjukkan nilai kecepatan gelombang geser dari pengukuran MASW dan hasil pengukuran pembandingan hasil kecepatan gelombang geser dengan korelasi N-Standard Penetration Test (N-SPT). Untuk mengverifikasi hasil pengukuran MASW, dilakukan perbandingan antara hasil studi ini dengan beberapa korelasi empirik dari studi-studi sebelumnya sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 10. Profil kecepatan gelombang geser dari pengukuran MASW secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan is generally larger than shear wave velocities obtained from correlated N value.

**Table 1:** Shear Wave Velocities Ranges of MASW and Correlation

Site/Line	Kedalaman	Vs dari (MASW)	Vs dari (N-SPT)
<b>FUU</b>			
Line 1	0 – 18.7	198.63-680.19	
Line 2	0 - 24.9	153.97-943.07	89.11-439.99
Line 3	0 – 21.2	196.34-804.91	
<b>PPU</b>			
Line 1	0 – 11.6	106.17-521.08	107.10-439.99
Line 2	0 – 12.1	92.62-715.60	
Line 3	0 – 21.3	123.78-1340.3	
Line 4	0 – 11.5	196.05-705.69	142.25-439.99
Line 5	0 – 17.4	108.71-902.54	



**Gambar 10.** Perbandingan kecepatan gelombang geser hasil pengukuran MASW dengan korelasi empirik dari studi sebelumnya dari lokasi di Kampus UKM

## Kesimpulan

Metode seismik *Multi-channel Analysis of Surface Wave* (MASW) merupakan salah satu metode non-destruktif yang efektif dan efisien yang dapat digunakan untuk mengukur secara langsung kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) suatu material bawah permukaan. Aplikasi metode ini dilapangan tidak sulit dan cepat begitu juga dengan proses pengolahan serta analisis datanya. Dengan menggunakan metode dan teknik yang tepat, pemisahan jenis-jenis gelombang yang terekam dapat langsung dilakukan. Sifat dispersi dari material pun kemudian dapat ditentukan sehingga diperoleh profil kecepatan gelombang geser satu dimensi dan dua dimensi. Dengan profil dua dimensi, kondisi lapisan tanah bawah permukaan dapat digambarkan dengan lebih jelas dan akurat. Metode MASW juga dapat digunakan untuk mendapatkan profil daya dukung tanah dengan akurat dan secara bersamaan dapat digunakan untuk mengobservasi diskontinuitas sub-permukaan.

## Daftar Pustaka

- Athanasopoulos, GA.. (1995). Empirical correlations  $V_s$ -NSPT for soils of Greece: a comparative study of reliability, Proc.7th Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (Chania Crete) ed AS Cakmak (Southampton: Computational Mechanics), pp19–36.
- Dikmen, U. (2008). Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance Soils,” J. Geophys. Eng. 6 61–72.
- Hasancebi, N., and Ulusay, R.. (2006). Empirical Correlations between Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Ground Shaking Assessments. Bull. Eng. Geol. Environ, 66 203–13.
- Imai, T. and Tonouchi, K. (1982). Correlation of N-value with S-wavevelocity and shear modulus”, Proc. 2nd European Symp. of Penetration Testing, Amsterdam, pp 57–72.
- Kaufmann RD, Xia J, Benson R, Yuhr LB, Casto DW and Park CB. (2005). Evaluation of MASW data acquired with a hydrophone streamer in a shallow marine environment. *J Environ Eng Geophys* 10(2):87–98.
- Lee, SH. (1990). Regression models of shear wave velocities, J.Chin. Inst.Eng., 13519–32.



- Miller, R.D., Xia, J., Park, C.B., and Ivanov, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Leading Edge* 18: 1392-1396.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Miura, H. (2002). Optimum field parameters of an MASW survey [Exp. Abs.]: SEG-J, Tokyo, May 22-23, 2002.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (2001). Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MSW): Proceedings of the SAGEEP 2001, Denver, Colorado, SSM-4.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Hunter, J.A., and Harris, J. B. (1999a). Higher mode observation by the MASW method: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 524-527.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999b). Multi-channel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics* 64: 800 – 808.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999c). Multimodal analysis of high frequency surface wave. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 99), Oakland, CA, March 14-18, p. 115-122.
- Ryden, N., Park, C.B., Ulriksen, P. and Miller, R.D. (2004). Multimodal approach to seismic pavement testing. *J Geotech Geoenviron Eng* **130**(6): 636–45.
- Seed, HB., and Idriss, IM. (1981). Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes, ASCE National Convention (MO), pp81–544.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B. (1999a). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics* 64: 691-700.
- Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., Hunter, J.A., dan Harris, J.B. (1999b). Evaluation of the MASW technique in unconsolidated sediments: Technical Program with Biographies, SEG, 69th Annual Meeting, Houston, TX, 437-440.
- Xia, J., R.D. Miller, C.B. Park, and J. Ivanov. (2000). Construction of 2-D vertical shear-wave velocity field by the multichannel analysis of surface wave technique: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2000), Arlington, Va., February 20-24, p. 1197-1206.
- Xia, J., Xu, Y., Chen, C., Kaufmann, R.D. and Luo Y. (2006). Simple equations guide high-frequency surface-wave investigation techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26: 395–403.