

KARAKTERISTIK GEOTEKNIK LAPISAN SEDIMEN DI KECAMATAN KUTA ALAM, BANDA ACEH MENGUNAKAN METODE GELOMBANG PERMUKAAN

Khaizal Jamaluddin^{1,2}, Muhd Budi², Syukri Syurbakti², Hendra Gunawan¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

²Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh,

Corresponding Author: khaizal@unsyiah.ac.id

Abstract : *Surface wave is the latest method that can estimate the depth, stiffness of the soil. This method has been developed and intensive used in geotechnical at the end of 1999. The study focused on three sites: Beurawe site, Lampulo and Lambaro Skep district of Kuta Alam in Banda Aceh. Field tests using the Multi-channel analysis of surface waves (MASW). In the test, the sediment layers were characterized by depth and shear wave velocity parameters. The results suggests that characteristics of the soil layer through shear wave velocity parameters per depth can provide subsurface geotechnical information. It can complement data from the conventional method which has been used.*

Keywords : *Geotechnic, MASW, Shear wave velocity*

Abstrak : Gelombang permukaan merupakan metode terkini yang dapat mengestimasi kedalaman, kekakuan dari lapisan tanah. Metode ini telah dikembangkan dan mulai digunakan di dalam geoteknik di akhir tahun 1999. Penelitian fokus pada tiga *site* penyelidikan yaitu *site* Beurawe, Lampulo dan Lambaro Skep di Kecamatan Kuta Alam Banda Aceh. Pengujian lapangan menggunakan Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Di dalam pengujian, lapisan sedimen dikarakteristik dengan kedalaman dan parameter kecepatan gelombang geser. Hasilnya memberikan gambaran bahwa karakteristik lapisan tanah melalui parameter kecepatan gelombang geser per kedalaman dapat memberikan informasi geoteknik bawah permukaan. Hal ini dapat melengkapi data dari metode konvensional yang selama ini digunakan.

Kata kunci : Geoteknik, MASW, Kecepatan gelombang geser

Secara geomorfologi, Banda Aceh berupa kawasan dataran rendah (graben) yang dilapisi sedimen yang dibentuk dari proses geomorfik sedimentasi marin dan fluvialik sistem dengan umur jutaan tahun lalu (Holosen). Lapisan sedimentasi alami ini mempunyai perilaku heterogeneus, anisotropi. Pengetahuan terhadap karakteristik tanah serta distribusi spasial di dalam kawasan adalah sesuatu hal yang menarik untuk dikaji di dalam perencanaan infrastruktur sipil atau geoteknik. Di dalam kawasan aktif seismik estimasi

logging kecepatan gelombang geser (V_s) terhadap sedimentasi permukaan adalah bagian vital didalam kajian zonasi bahaya gempa dan kajian geoteknik subpermukaan. Terdapat dua pendekatan utama di dalam menentukan subsurface struktur, satu diantaranya dengan metode invasive yaitu dengan *bore hole* data, *cone penetration* data sedangkan metode lain dengan metode non invasive berupa metode seismik permukaan.

Metode konvensional berupa *borehole*, *standard penetration test* (N-SPT) dan *cone*

penetration test (CPT) telah digunakan dan diterima secara umum oleh kalangan geotechnical engineers dalam rangka estimasi karakteristik dan kekakuan kolom tanah. Sekarang ini dengan berkembang teknologi, metode geofisika seperti eksplorasi seismik *non-invasive* yang merupakan sebuah solusi sebuah solusi yang cukup menjanjikan untuk eksplorasi bawah permukaan, dimana metode ini relatif murah, cepat dan dapat diimplementasikan di kawasan pemukiman tanpa kesulitan. Di dalam seismik, parameter kecepatan gelombang ada dua jenis yaitu V_p (kecepatan gelombang tekan) dan V_s (kecepatan gelombang geser). Kecepatan gelombang V_p dengan uji seismik refraksi sudah umum dilakukan, sedangkan V_s dengan uji gelombang permukaan masih jarang digunakan untuk uji geoteknik subpermukaan.

Gelombang permukaan aktif dan pasif telah digunakan untuk karakterisasi lapisan sedimen penutup pada kaki pegunungan Himalaya dalam rangka analisis mikrozonasi bahaya gempa bumi (Mahajan et al., 2011). Untuk aplikasi yang lain, Karl et al., 2011 telah menggunakan metode gelombang permukaan untuk karakterisasi geoteknik tanggul penahan banjir (*dyke*) di sentral daratan Eropa. Gunn et al. (2006) telah menggunakan metode gelombang permukaan untuk pengukuran karakteristik kekakuan dinamik timbunan *railway*.

Paper ini berusaha mencari wawasan baru pada penggunaan gelombang permukaan untuk survey investigasi geoteknik sub permukaan secara umum pada suatu kawasan.

Penampang dua dimensi terhadap kecepatan gelombang geser didapatkan untuk interpretasi perilaku heterogenesis lapisan. Informasi akhir dari kawasan ini dapat digunakan untuk kegunaan preliminary planning infrastruktur sipil di kawasan penelitian.

Metode Gelombang Permukaan

Analisis gelombang permukaan menggunakan properti elastis gelombang yang dibatasi dengan permukaan bebas (*free surface*), seperti interface permukaan tanah dengan atmosfer bumi. Di dalam seismology, gelombang permukaan terbagi dua yaitu gelombang Rayleigh dan gelombang Love. Banyak kasus menggunakan gelombang Rayleigh dihasilkan dari superposisi gelombang P dan SV. Pergerakan partikel secara vertikal gelombang ini ditekankan pada bidang vertikal sesuai dengan arah propagasi. Kedalaman penetrasi tergantung pada panjang gelombang Rayleigh. Panjang gelombang yang lebih besar penetrasi lebih dalam dari pada yang lebih pendek. Phase velocity merupakan fungsi dari *dynamic stiffness*, *shear stiffness* dan density material dalam zona penetrasi, gelombang Rayleigh berperilaku dispersive. Fungsi antara *phase velocity* dan *frequency* dinamakan kurva dispersi yang mengandung informasi tentang lapisan tanah (Karl et al., 2011). Ketergantungan pada stratifikasi lapangan, gelombang Rayleigh dapat merambat pada waktu yang sama dalam mode yang berbeda seperti pada *single frequency* lebih dari satu *diskred phase velocity* dapat diukur. Perbedaan tingkatan modes perambatan merujuk pada *phase*

velocity. Mode dengan angka yang rendah disebut *fundamental mode*.

Prosedur pemrosesan data gelombang permukaan untuk menghasilkan S-wave profiles satu dimensi yang disebut spectral analysis of surface wave (SASW) telah diperkenalkan oleh Stokoe and Nazarian (1983) dan Nazarian et al (1983). Metode ini sekarang telah digunakan secara luas dalam banyak aplikasi pekerjaan geoteknik. Set-up eksperimen mengandung sumber aktif seperti sledge hammer atau weight drop dan dua receivers permukaan. *Phase velocity* diturunkan dari cross power spectrum antara signal penerima.

Perkembangan terakhir dari penelitian ini pada pengembangan identifikasi mode dengan penerapan *frequency wave numbering technique* dan *linear array of receivers* (Al-Hunaidi 1996; Park et al. 1999; xia et al. 1999). Penerapan pendekatan multi receivers dikenal sebagai metode Multi channel analysis of surface wave (MASW) dan menghasilkan kecepatan pengujian yang lebih signifikan. *Set-up* MASW dapat diatur sepanjang line dan shots dapat di ulang setiap beberapa meter. Jika receiver dipasang pada land streamer array maka dapat ditarik pada kendaraan. Pemberian energi hammer melalui single shot menghasilkan masih hanya satu dimensi (1-D) profile. Pengujian profiles pada satu line atau lebih line secara paralel dapat dimodelkan dalam dua dimensi (2-D) atau tiga dimensi (3-D) image terhadap site melalui teknik interpolasi seperti *Krigging*. Hasil lebih lanjut dari inversion untuk menentukan kecepatan gelombang geser dan material damping ratio

secara simultan telah dijelaskan di dalam Rix et al. (2000), Lai et al. (2002) dan Badsar et al. (2010).

MASW test terdiri dari tiga langkah. Sebagai langkah pertama yaitu eksperimen lapangan termasuk pembangkitan getaran dan record signal seismic. Penentuan kurva dispersi eksperimen dengan perbandingan *frequency-wavenumber* atau *phase velocity* dengan *frequency spectrum*. Jika ada penampakan perbedaan mode maka dapat dipisahkan modenya. Yang terakhir adalah langkah menentukan masalah inversi yaitu sebuah problem optimasi antara eksperimen dan *computed theoretical dispersion curve*.

Lebih dari beberapa tahun, sejumlah teknik inversi telah dikembangkan: Fundamental mode menggunakan hanya *fundamental dispersion curve*, sementara multi-mode inversion dengan menggabungkan mode lebih tinggi dan *effective mode inversion* menggunakan kurva dispersi bahwa dengan *frequency* dari satu mode kepada mode yang lain mengikuti mode dengan energi tinggi pada *particular frequency*. Beberapa pandangan tentang mode lebih tinggi dan metode inversi terkini menggunakan efektif inversion curve dapat dilihat di dalam O'Neill dan Matsuoka (2005).

Deskripsi lapangan dan geologi lokal

Penelitian ini diuji pada kecamatan Kuta Alam, Kota Banda Aceh. Secara geografis Kuta alam berada sebelah utara Sungai Krueng Aceh yang membelah kota Banda Aceh menjadi dua bagian. Merupakan daerah lingkungan pemukiman penduduk dengan

jenis infrastruktur berupa Jalan, perumahan, perkantoran, gedung pendidikan serta pusat-pusat perbelanjaan. Secara umum lokasi pengujian di kecamatan kuta alam ini berada dalam cekungan Banda Aceh (Banda Aceh Basin). Di batasi oleh dua patahan besar yaitu patahan seulumbeum, Sumatra (Seumangko) serta dibatasi juga oleh patahan subduksi yang paralel dengan patahan Sumatera. Karena dibatasi oleh patahan besar maka Banda Aceh termasuk dalam kawasan tektonik aktif. Lapisan Sedimen daerah pengujian dibentuk proses fluvial dari sistem jaringan aliran sungai kuno pada jutaan tahun silam. Sedimen dari proses fluvial ini yang biasa disebut alluvial dibentuk dari material tanah lempung, lanau, pasir serta kerikil. Satuan endapan alluvial ini termasuk dalam satuan sedimentasi Quarter atau Halosen menurut umur geologi.

METODOLOGI PENELITIAN

Didalam penelitian ini, data yang ditampilkan adalah sebanyak tiga lokasi pengukuran di dalam kecamatan Kuta Alam yaitu: Beurawe ($5^{\circ}33'8.34''N; 95^{\circ}20'4.20''E$), Lampulo ($5^{\circ}34'3.48''N; 95^{\circ}19'11.04''E$) dan Lambaro Skep ($5^{\circ}34'15.93''N; 95^{\circ}34'15.93''N$). Pada kasus pengujian di kawasan pemukiman ruang yang tersedia terbatas untuk memproduksi 1-D, 2-D profil, hal ini merupakan tantangan. Pada kasus ini kami cari tempat seperti sekolah, kompleks kantor desa setempat dan lapangan terbuka lainnya. Gambar 1. diperlihatkan sebanyak tiga site penelitian.

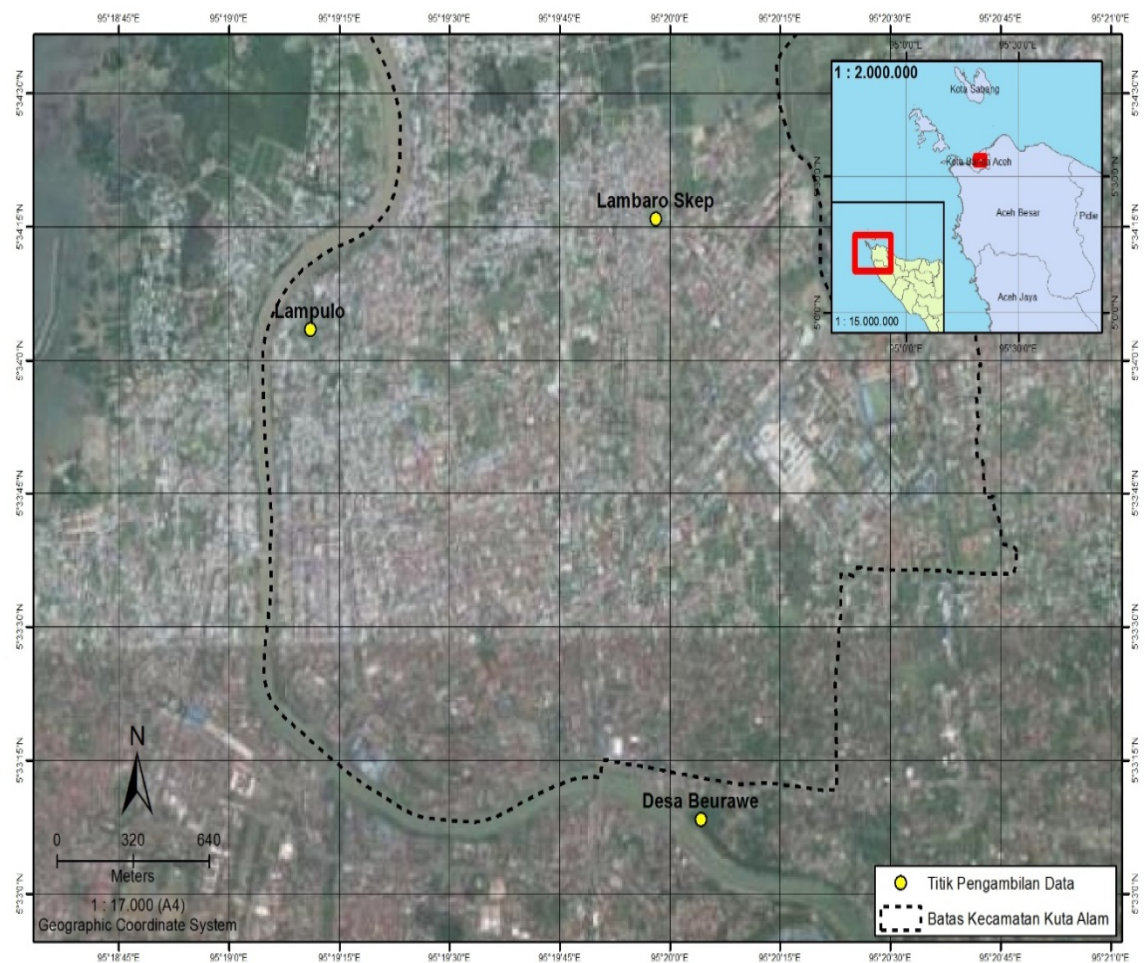
Akuisisi data lapangan pengujian seismik aktif MASW dilakukan sama dengan layout pengujian seismik refleksi. Record signal

menggunakan *seismograph* PASI 16S-24P sebanyak 24 channel. Frekwensi geophone vertikal yang digunakan adalah 10 Hz yang ditancapkan secara garisan linear dengan spasi 1 m. Spasi ini telah mempertimbangkan efek dari kemungkinan terjadi *aliasing* signal antara *geophone*. Survey yang telah dilakukan sepanjang linear array menggunakan metode fixed along mode dengan *sampling time* 250 mikro second dengan total panjang record garisan 1024 milli second untuk setiap record signal. Sumber *offset* dari geophone pertama 5 m. *Sledgehammer* 10 kg telah digunakan dengan tinggi jatuh kira-kira 1,5 m dengan plate metal ukuran 30 cm x 30 cm tebal 2,5 cm. Untuk menghasilkan 2-D profile ketukan sledgehammer dilakukan pada offset dan sepanjang diantara geophone.

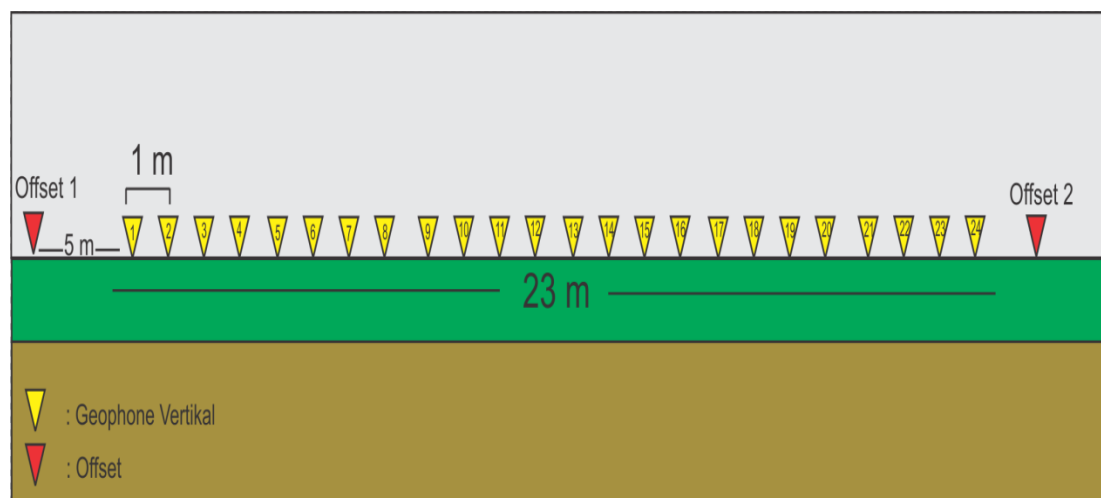
Kurva dispersi gelombang permukaan didapatkan dari data MASW melalui prosesing yang dilakukan dengan Seisimager software. Raw seismic data didalam format .dat dengan kombinasi semua shot dari *single file*. Hasil dari prosesing seismic record dalam bentuk dispersi image dimana amplitudo (represented colours) merupakan fungsi dari frekwensi dengan *phase velocity* (Gambar 4). Dari image ini, kurva dispersi diidentifikasi melalui rujukan frekwensi dan *phase velocity* maksimum. Di dalam analysis gelombang permukaan, signal frekwensi 2-3 Hz dapat direcord dengan 4.5 Hz geophon. Xia et al (2000) mengatakan investigasi menggunakan geophone 10 Hz dapat mendeteksi gelombang frekwensi 5 Hz. Hal ini telah diamati bahwa deteksi gelombang dengan frekwensi rendah tidak dibatasi dengan

frekwensi alami geophone. Penggunaan geophone 10 Hz memberikan hasil yang

hampir identik dengan geophone 4.5 Hz (Park et al. 2000).



Gambar 1. Titik site penelitian di Kecamatan Kuta Alam, Banda Aceh



Gambar 2. Konfigurasi geophone di saat pengukuran

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penampang 1 D kecepatan gelombang geser V_s

Salah satu contoh hasil rekaman penjalaran gelombang bawah permukaan diperlihatkan adalah pada site pengujian Lambaro Skep. Contoh gelombang ini, posisi shot pada offset yaitu 10 m dari geophone pertama. *Travel time* gelombang rayleigh yang didapatkan pada geophone terakhir sebesar 500 milli second. Prosessing dari domain waktu ke domain frekwensi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) menghasilkan dispersi image (Gambar 4). *Phase velocity* terlihat dalam range 140 sampai 310 m/s. Hasil inversi (Gambar 5) memperlihatkan kecepatan gelombang geser per kedalaman. Gelombang Rayleigh mampu mendeteksi keadaan lapisan yang tipis karena sifat dispersinya. Kedalaman prosessing hanya dibatasi hingga 20 m ke bawah.

Penampang longitudinal 2D kecepatan gelombang geser (V_s)

Site Beurawe

Profil V_s 1D diperoleh, nilai V_s dikompilasi untuk mendapatkan pemodelan 2D per lapisan kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman yang dapat ditampilkan secara dua dimensi menggunakan *software Surfer 11* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Dari proses inversi yang telah dilakukan didapatkan model kecepatan gelombang geser sebagai fungsi posisi pada masing-masing lintasan mencapai kedalaman model 20 meter dan jarak yang telah ditentukan yaitu 33 meter.

Citra kecepatan gelombang geser yang diperoleh dari hasil pemodelan pada lintasan mempunyai range 80 m/s sampai 250 m/s. Dari awal sampai akhir lintasan, kondisi lapisan memperlihatkan ketidakseragaman, hal ini berdasarkan warna yang ditunjukkan. Jika dilihat dari range kecepatan gelombang geser lintasan ini menunjukan kepadatan tanah lunak hingga sedang. Dari jarak 0 – 7 meter, 14 – 20 meter, 23 – 33 meter, dari permukaan sampai kedalaman 20 meter didominasi oleh warna oleh warnabiru, memiliki nilai 80 – 150 m/s, berarti terdiri dari endapan tanah lunak. Hanya sedikit endapan tanah kepadatan sedang sedang, yaitu pada jarak 20 – 23 meter dari kedalaman 6 meter sampai 20 meter dengan kecepatan gelombang geser 150 – 250 m/s.

Site Lampulo

Citra kecepatan gelombang geser sebagai fungsi dari hasil pemodelan pada lintasan mempunyai range 80 m/s sampai 240 m/s (Gambar 7). Untuk lapisan top soil dari permukaan sampai kedalaman 5 meter ditutupi oleh tanah lunak yang memiliki nilai 80 – 150 m/s. Dari jarak 15 – 18 meter, 25 – 32 meter, dari kedalaman 5 meter sampai 20 meter didominasi oleh warna hijau yang memiliki nilai 150 – 260 m/s yang berarti memiliki endapan tanah kepadatan sedang. Hasil kecepatan gelombang geser menunjukkan bahwa lintasan ini juga memperlihatkan heterogenities lapisan walaupun dalam range yang tidak terlalu lebar. Rentang ini sudah cukup menunjukkan keberagaman kepadatan tanah yaitu tanah lunak hingga tanah

kepadatan sedang.

Site Lambaro Skep

Hasil citra kecepatan gelombang geser pada sepanjang lintasan mempunyai range 80 m/s sampai 220 m/s. Penampang longitudinal 2D diperlihatkan pada Gambar 8. Hal ini memperlihatkan material dengan kekuatan rendah ($V_s < 150$ m/s) di sepanjang penampang 2D. Pada tempat-tempat tertentu penampang 2D memperlihatkan kolom tanah kekuatan sedang ($V_s > 150$ m/s) seperti pada jarak 7 sampai 16 m pada kedalaman 6 m ke bawah, hal ini dimungkinkan adanya endapan kolom pasir. Untuk pembuktian perlu dibandingkan dengan metode test geoteknik yang lain seperti borehole atau sondir. Dari pengujian MASW ini, kualitas seismik record dan kalkulasi *phase velocity*/frekwensi spektra tidak memberikan indikasi bahwa hasil-hasil uji MASW kurang reliable. Namun demikian untuk penelitian selanjutnya perlu dibandingkan hasil MASW dari 2 arah shot untuk menghasilkan penampang 2D MASW yang lebih dapat diterima untuk aplikasi dekat permukaan seperti yang dijelaskan oleh Steinell, H. et al. (2014).

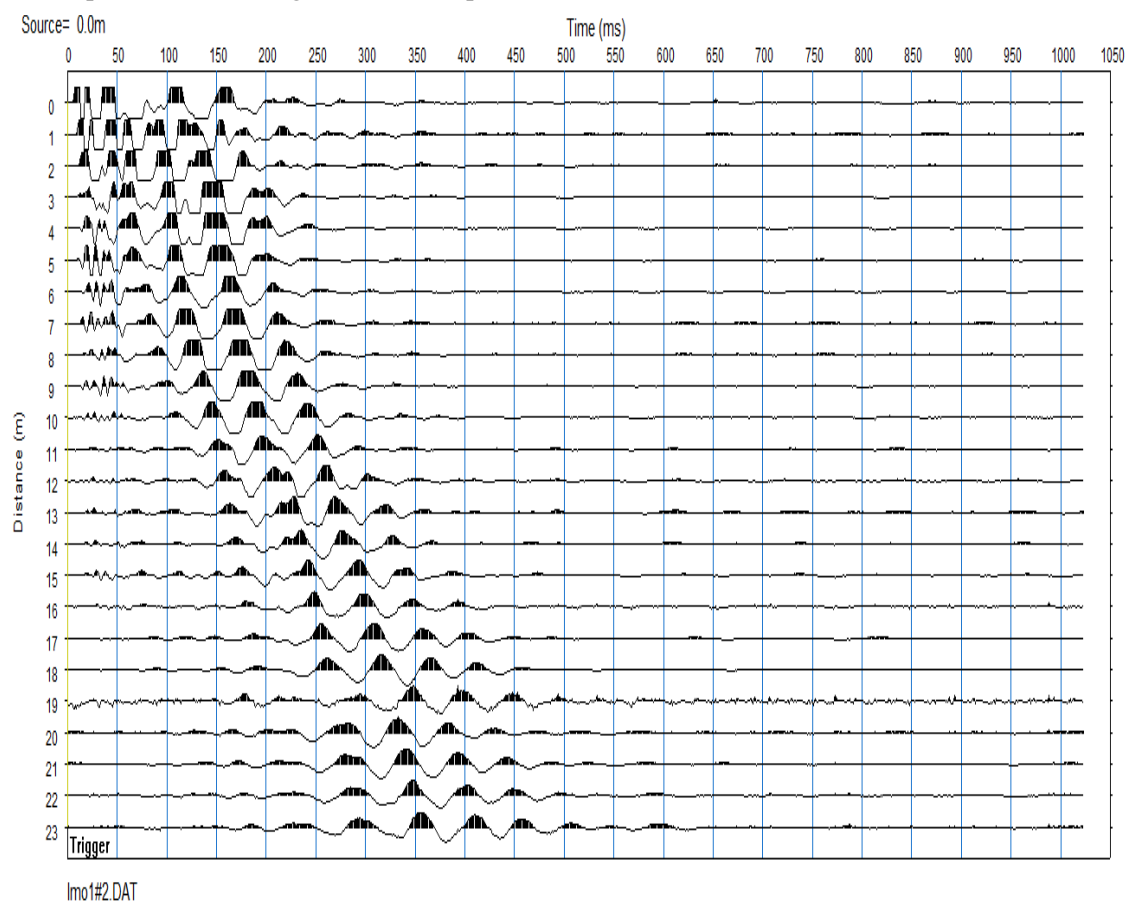
Pengujian MASW ini telah dilakukan untuk tiga *site* pada Kecamatan Kuta Alam, yang berada dalam cekungan Banda Aceh. Ke tiga *site* ini memperlihatkan karakteristik lapisan sedimen dengan ketebalan dan komposisi yang berbeda. Di dalam studi ini, analisis gelombang permukaan dengan estimasi dispersi telah dilakukan. Proses inversi telah

digunakan untuk estimasi profil kecepatan gelombang geser yang dirangkum dalam bentuk kecepatan gelombang geser (V_s) dan ketebalan lapisan (Gambar 5).

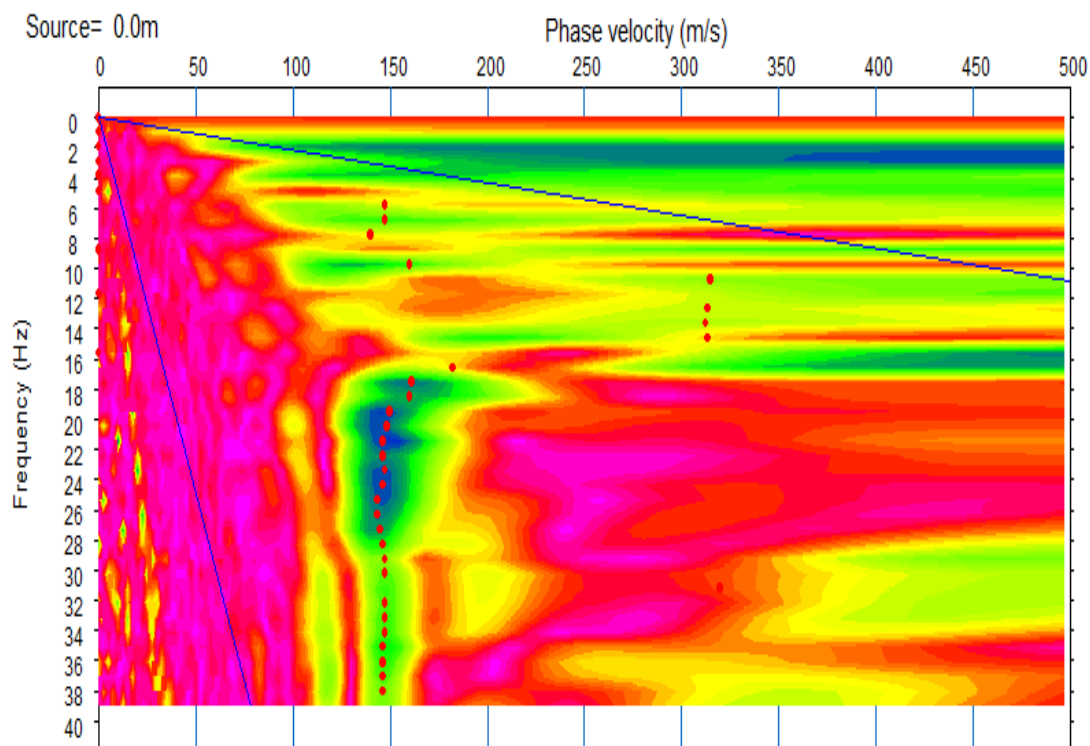
Penggunaan metode *non invasive* telah memperlihatkan kelebihanannya di dalam menjelaskan informasi bawah permukaan, penampang *longitudinal* 2D MASW memperlihatkan variasi lithologi menurut arah penampang horizontal. Hal ini tidak dapat dihasilkan oleh metode uji konvensional seperti *borehole* dan *cone penetration test* yang memberikan informasi lapisan berupa 1D. Bagaimanapun integrasi metode konvensional berupa *borehole* dan *cone penetration test* dengan metode *non invasive* MASW akan menambah kelengkapan informasi geoteknik lapisan bawah permukaan. Metode MASW ini mudah dikerjakan, tidak mahal, peralatan dapat dimobilisasi dengan cepat dan tidak merusak lingkungan.

Pengujian pada tiga *site* memberikan hasil yang sesuai dengan karakteristik geologi setempat. Kawasan ini merupakan lapisan sedimentasi dengan material berupa campuran pasir halus sampai sedang, lanau hingga lempung yang terendap secara alami. Proses endapan menghasilkan endapan yang sangat lunak, lunak, hingga sedang. Untuk lapisan sangat lunak hingga lunak menghasilkan kecepatan gelombang geser 80 sampai 150 m/s. Lapisan kepadatan sedang didapatkan 150 sampai 150 m/s. Informasi seperti ini walaupun diuji dengan parameter dinamik kecepatan gelombang geser, sangat bermanfaat untuk membantu *geotechnic engineers* menginterpretasi kondisi lapisan

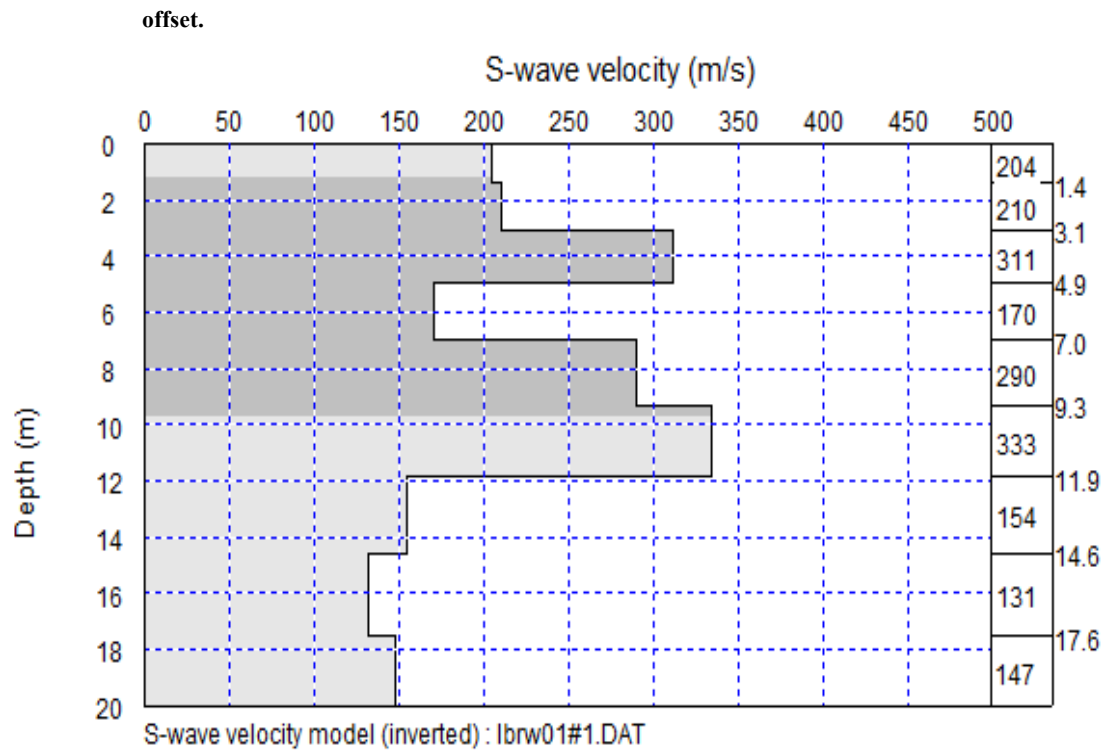
untuk perencanaan berbagai konstruksi sipil.



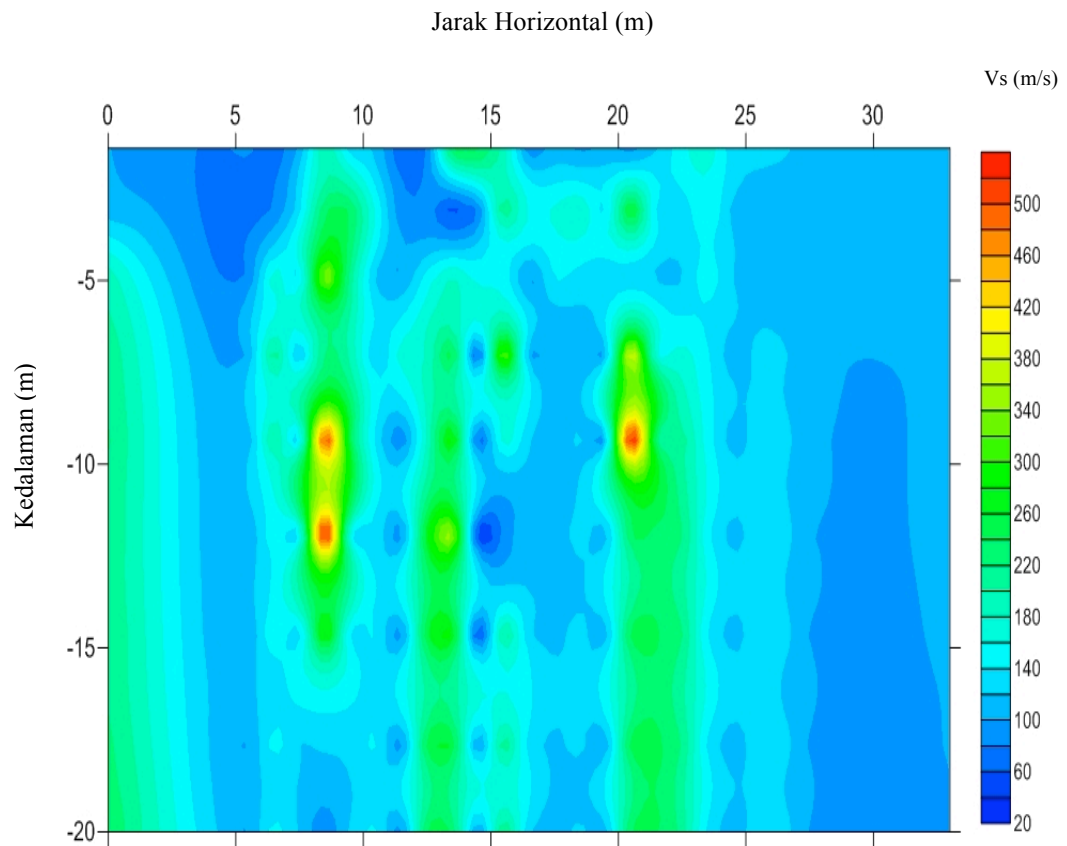
Gambar 3. Hasil rekaman penjalaran gelombang pada lokasi Lambaro Skeps shoot 1 di posisi *offset*.



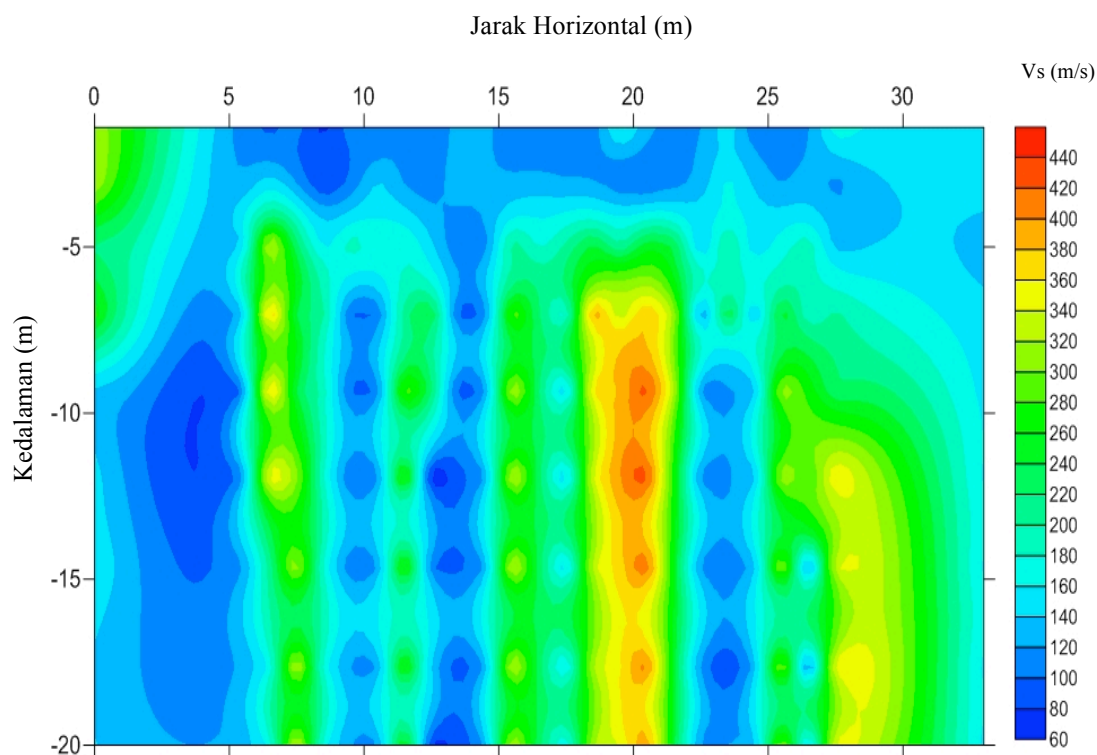
Gambar 4. Dispersi image berupa korelasi kecepatan fase terhadap frekuensi Lampulos shoot 1 di posisi



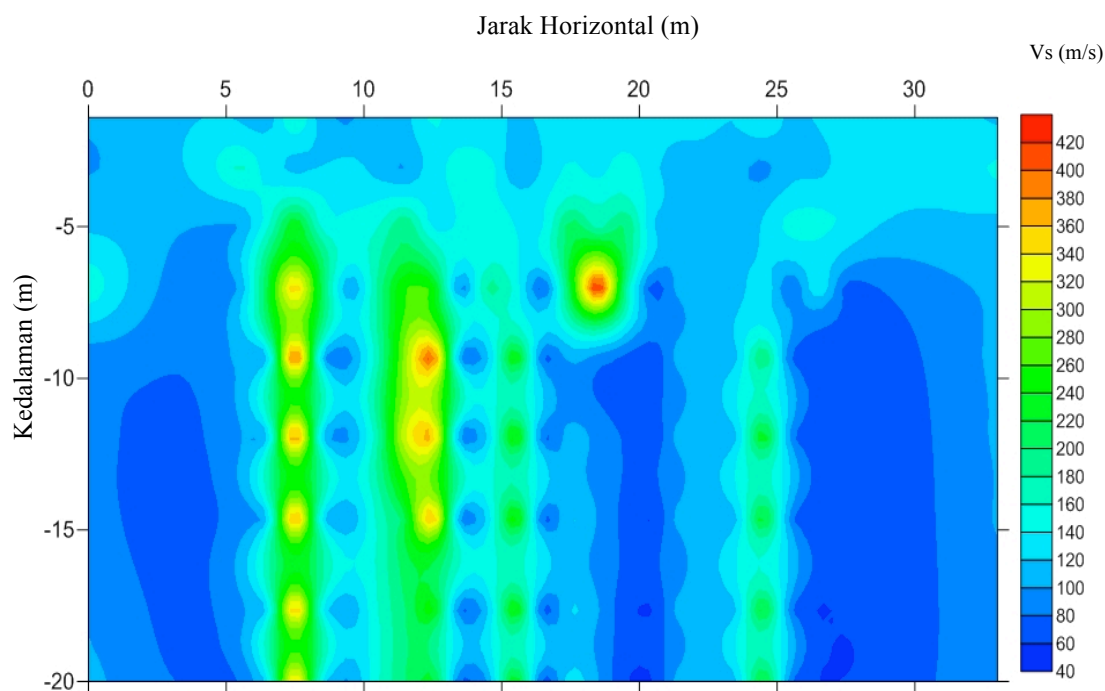
Gambar 5. Profil S-wave Velocity terhadap kedalaman pada lokasi Lampuloshoot 1 di posisi offset



Gambar 6. Penampang longitudinal 2D site Beurawe



Gambar 7. Penampang longitudinal 2D site Lampulo



Gambar 8. Penampang longitudinal 2D site Lambaro Skep

KESIMPULAN

Gelombang permukaan yang menjalar di lapisan permukaan tanah yang terdiri dari gelombang Rayleigh dan Love. Sifatnya dispersi yaitu terjadi perubahan panjang

gelombang bila melewati lapisan dengan sifat elastis yang berbeda. Sifat dispersi ini ternyata dapat dimanfaatkan untuk karakterisasi lapisan-lapisan geologi baik sangat lunak, lunak, sedang maupun keras. Hasil pengujian

dari tiga *site* di Kecamatan Kuta alam hasil yang didapat sesuai dengan keadaan geologi setempat.

Ucapan terimakasih

Terimakasih yang tak terhingga diberikan kepada Ketua Prodi Teknik Geofisika Universitas Syiah Kuala, Bapak Marwan, MT yang telah memberi akses terhadap peralatan akuisisi. Terimakasih yang mendalam kepada Assoc. Prof. Dr. Taksiah Majid dari *School of Civil Engineering*, Universiti Sains Malaysia yang telah memberikan izin memakai program Seisimager. Saudara Ryan Fachrianta, Muhd Haikal dan kawan-kawan mahasiswa Teknik Geofisika angkatan 2011 yang telah membantu akuisisi data lapangan.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Al-Hunaidi M.O. 1996 Nondestructive evaluation of pavements using spectral analysis of surface waves in the frequency wave-number domain. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 15, 71-82.
- Badsar S.A., Schevenels M., Haegeman W. And Degrande G. 2010. Determination of the material damping ratio in the soil from SASW test using the half power bandwidth method. *Geophysics Journal International*. 182, 1493-1506.
- Steinel H., Hausmann J., Welban U., Dietrich P. 2014. Reability of MASW profiling in near surface application. *Near Surface Geophysics*. 12, 731-737.
- Gun D.A., Nelder L.M., Chambers J.E., Raines M.G., Reeves H.J., Boon D.P., Pearson S.G., Haslam E.P., Carney J.N., Stirling A., Ghataora G.S., Burrow M.P.N., Tinsley R.D. and Tilden-Smith R. 2006. Assesment of railway embankment stiffness using continuous surface waves. *Proceeding of the 1st International Conference on Railway Foundations*. Birmingham, UK, Expanded Abtracts, 94-106.
- Karl L., Fechner T., Schevenels M., Francois S. and Degrande G. 2011. Geotechnical characterization of a river dyke by surface waves. *Near Surface Geophysics*. 9, 515-527.
- Lai C.G., Rix G.J., Foti S. And Roma V. 2002. Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 22, 923-930.
- Mahajan A.K., Galiana-Merino J.J., Lindholm C., Arora B.R., Mundepi A.K., Rai. N. and Chauhan N. 2011. Characterization of the sedimentary cover at the Himalayan foothills using active and passive seismic techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 73, 196-206.
- Nazarian S., Stokoe II K.H. and Hudson W.R. 1983. Use of spectral analysis of surface waves method for the determination of moduli and

- thickness of pavement system.
Transportation Research Record.
930, 38-45.
- O'Neill A. And Matsuoka T. 2005.
Dominat higher surface wave modes
and possible inversion pitfalls.
Journal of Environmental and
Engineering Geophysics. 10, 185-
201.
- Park C.B., Miller R.D and Xia J. 1999.
Multichannel analysis of surface
waves. Geophysics. 64, 800-808.
- Rix G.J., Lai C.G. and Spang A.W. 2000.
In situ measurement of dumping
ratio using surface waves. Journal of
Geotechnical and Geoenvironmental
Engineering. 126, 472-480
- Stokoe II K.H and Nazarian S. 1983.
Effectiveness of ground
improvement from spectral analysis
of surface waves. 8th European
Conference on Soil Mechanics and
Foundation Engineering, Helsinki,
Finland, Expanded Abstracts.
- Xia J., Miller R.D. and Park C.B 1999.
Estimation of near surface shear
wave velocity by inversion of
Rayleigh waves. Geophysics. 64,
691-700.