

# Struktur Bawah Permukaan pada Lokasi Rencana Pembangunan Rumah Sakit Muhammadiyah Kota Bengkulu dengan Metode seismik MASW Secara 2 Dimensi

Ashar Muda Lubis\*, Bella Satriani, Lizalidiawati, Rida Samdara

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Jl. WR. Supratman, Kadang Limun, Muara Bangkahulu, Bengkulu, 38371

\*Email : asharm1@unib.ac.id

(Diterima 25 September 2019; Disetujui 20 Mei 2020; Dipublikasikan 16 September 2020)

## Abstrak

A study on the subsurface structure has been conducted using the multichannel analysis of surface wave (MASW) method near Tugu Hiu, Bengkulu City, the location where Muhammadiyah hospital will be built. We aimed to determine the subsurface structure in 2-Dimension (2D) to classify soil type on the location. The data were measured with seismograph PASI 16S24-P using 24 geophones for a track of 72 m of total length and 1.5 m of intervals. The seismic data were processed by using seismic ParkSeis software. The results show that shear wave velocity ( $V_s$ ) is 800-1200 m/s at a depth of 1-5 m, indicating this layer is filled by rock type (unsaturated). At a depth of 6-8 m below surface,  $V_s$  value decreases to 400-500 m/s which may indicate that the soft rock type fills the layer. The results of this study provide a high level of confidence, about 80-100%, in the  $V_s$  value. Thus, we suggest for the foundation of hospital construction, the pillars for construction must be for more than 10 m in depth with a solid concrete foundation. This to ensure the foundation can withstand the building in case of shake during an earthquake.

Keywords: MASW, seismic method, subsurface structure, shear wave velocity ( $V_s$ )

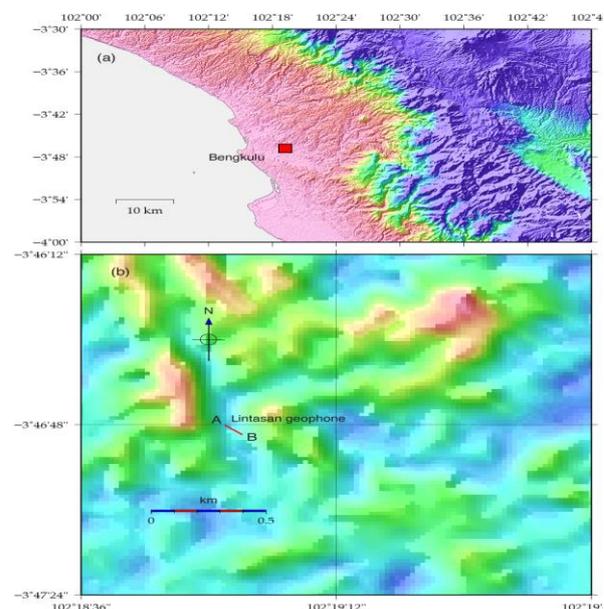
## 1. Latar Belakang

Provinsi Bengkulu mempunyai luas wilayah 19.788,70 km<sup>2</sup> atau 1.978.870 ha. Luas ini meliputi luas daratan utama di Pulau Sumatra dan beberapa pulau di perairan Bengkulu. Secara geografis, wilayah Provinsi Bengkulu berada sebelah selatan garis khatulistiwa (Gambar 1). Wilayah Provinsi Bengkulu berada pada daerah yang sangat rawan gempa bumi. Hal ini disebabkan daerah Bengkulu sangat berdekatan dengan dua sumber gempa bumi utama di Sumatra, yakni zona subduksi Sumatra dan patahan Sumatra.

Kota Bengkulu, dalam dua dekade terakhir, telah digoncang dua gempa bumi besar yakni pada tahun 2000 dengan momen magnitudo ( $M_w$ ) 7.9 [1,2,3] dan pada tahun 2007 dengan kekuatan  $M_w$  8.5 [4]. Saat ini, beberapa wilayah di Kota Bengkulu sedang giat-giatnya melakukan pembangunan diberbagai bidang seperti pembangunan infrastuktur berupa perluasan pemukiman dan pembangunan sarana dan prasarana fasilitas umum lainnya. Salah satu daerah yang dikembangkan Pemerintahan Daerah Kota Bengkulu yaitu wilayah Tugu Hiu dengan pemindahan instalasi-instalasi pemerintahan ke wilayah ini. Pembangunan meliputi perkantoran, seperti kantor DPR, kantor KPU, dan beberapa perumahan, serta sarana publik

seperti sekolah dan rumah sakit. Dalam waktu dekat, rumah sakit yang akan dibangun di sekitar Tugu Hiu adalah Rumah Sakit Muhammadiyah.

Rumah sakit merupakan sarana publik yang sangat penting dan merupakan tempat yang sangat diperlukan pada saat terjadinya bencana seperti gempa bumi dan tsunami. Disamping itu, di sebuah rumah sakit tentunya juga banyak terdapat



Gambar 1. Peta lokasi daerah Bengkulu (atas) dan peta lintasan daerah penelitian (bawah).

peralatan yang relatif mahal dan juga diperlukan bila terjadi gempa bumi. Oleh karena itu, sebelum sebuah rumah sakit didirikan, diperlukan sebuah kajian untuk mengetahui struktur di bawah permukaan, kekuatan tanah, dan kerentanan suatu bangunan terhadap gempa bumi pada tempat tersebut. Hal ini dilakukan sebagai upaya mitigasi bencana gempa bumi.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengetahui stuktur bawah permukaan adalah metode seismik [5]. Metode ini dapat memberikan informasi karakteristik bawah permukaan berdasarkan pada perhitungan kecepatan perambatan gelombang seismik, baik itu kecepatan gelombang primer ( $V_p$ ), maupun kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ). Kecepatan gelombang skunder yang disebut juga kecepatan gelombang geser transversal merupakan salah satu parameter penting untuk mengevaluasi kondisi dinamis dari tanah/bawah permukaan. Nilai  $V_s$  juga dapat dijadikan indikator utama dari respon tanah yang umumnya mendominasi amplifikasi gerakan tanah pada saat gempa bumi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui stuktur bawah permukaan di daerah yang akan didirikan Rumah Sakit Muhammadiyah Bengkulu dengan menggunakan metode seismik MASW melalui tomography 2 Dimensi (2D) dan interpretasi nilai kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ).

## 2. Metodologi

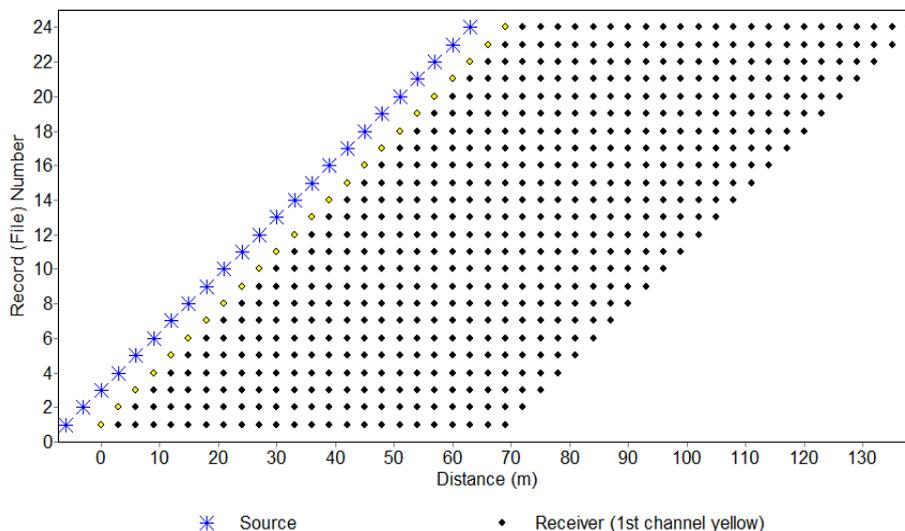
Pengambilan data lapangan (Gambar 2) dilakukan dengan menggunakan seismograph PASI 16S24-P dan 24 *geophone*. Jarak antara *geophone*



**Gambar 2.** Lokasi pengambilan data seismik.

adalah 1,5 m dan jarak antara sumber dengan *geophone* pertama sepanjang 3 m. Untuk mendapatkan profile struktur bawah permukaan secara 2D dilakukan teknik pengambilan data sebanyak 24 kali dengan perpindahan 1,5 m untuk tiap-tiap offset pada setiap pengukuran, sehingga pada penelitian ini didapatkan panjang lintasan keseluruhan 72 m. Gambaran geometri lintasan pengambilan data diperlihatkan pada Gambar 3. Pengolahan data seismik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ParkSeis [6].

Pada tahapan berikutnya, dilakukan analisis dispersi gelombang permukaan (gelombang Rayleigh) dari data rekaman *geophone* untuk keseluruhan data yang diperoleh. Pada tahapan ini, dihasilkan kurva dispersi kecepatan fase gelombang Rayleigh ( $C_R$ ) terhadap frekuensi ( $f$ ). Kemudian, dari hasil kurva dispersi yang didapatkan pada masing-masing lintasan, dilakukan inversi kecepatan fase gelombang



**Gambar 3.** Geometri lintasan pengambilan data seismik di lapangan.

Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) terhadap kedalaman secara 2D.

Secara teoritis, hubungan gelombang Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) pada frekuensi ( $f_j$ ) ditentukan oleh suatu persamaan karakteristik  $F$  yang bersifat nonlinier [7]:

$$F(f_j, C_{Rj}, V_s, V_p, \rho, h) = 0, \quad (1)$$

dengan  $j=1,2,\dots,m$ ,  $V_s = (V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sn})^T$  adalah kecepatan vektor gelombang sekunder ( $V_s$ ),  $V_{sn}$  adalah kecepatan gelombang sekunder pada lapisan ke- $n$ ,  $n$  adalah jumlah lapisan,  $V_p = (V_{p1}, V_{p2}, \dots, V_{pn})^T$  adalah kecepatan vektor gelombang primer,  $V_{pn}$  adalah kecepatan gelombang primer pada lapisan ke- $n$ ,  $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)^T$  merupakan vektor densitas,  $\rho_n$  adalah densitas pada lapisan ke- $n$ , dan  $h = (h_1, h_2, \dots, h_{n-1})^T$  adalah vektor kedalaman, dan  $h_n$  merupakan kedalaman pada lapisan ke- $n$ . Dengan menggunakan model parameter ( $V_s, V_p, \rho$  dan  $h$ ) dan frekuensi ( $f_j$ ), kecepatan fase Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) dapat ditentukan dari akar dari persamaan (1). Kecepatan fase gelombang Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) pada persamaan (1) merupakan fungsi nonlinier yang harus dilinierisasi dengan ekspansi deret Taylor. Jika kurva dispersi terdiri dari beberapa nilai, satu set persamaan dalam bentuk persamaan (1) dapat digunakan untuk menentukan kecepatan fase pada frekuensi  $f_j$  ( $j=1,2,\dots,m$ ).

Dalam proses inversi, nilai kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) yang diinginkan direpresentasikan sebagai bagian dari vektor  $x$ , dengan jumlah data  $n$  dengan  $x = [V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, \dots, V_{sn}]^T$ . Demikian pula pengukuran kecepatan fase gelombang Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) pada frekuensi  $m$  dapat direpresentasikan sebagai bagian dari vektor  $b$  dengan jumlah data  $m$  dengan  $b = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_m]^T$ . Kemudian, tahapan inversi dilakukan dengan menyelesaikan persamaan

$$J\Delta x = \Delta b \quad (2)$$

Pada persamaan ini,  $\Delta b = b - C_R(x_0)$  adalah perbedaan antara pengukuran dan pemodelan terhadap estimasi model awal, dengan  $C_R(x_0)$  adalah model awal dari kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ),  $x_0$ ;  $\Delta x$  adalah modifikasi/update dari model nilai kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) terhadap nilai awal  $x_0$ .  $J$  adalah matrik Jacobian dengan baris  $m$  dan kolom  $n$  ( $m > n$ ).

Bagian matrik Jacobian pada orde pertama merupakan turunan parsial dari kecepatan fase

Rayleigh ( $C_{Rj}$ ) yang merupakan kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) [8]. Bila jumlah titik data yang terdapat dalam dispersi kurva umumnya jauh lebih besar dari jumlah lapisan struktur bawah permukaan ( $m > n$ ), persamaan (2) dapat diselesaikan dengan teknik optimasi, sehingga dapat didefinisikan *objective function* sebagai berikut:

$$\Phi = \|\Delta x - \Delta b\|_2 W \|\Delta x - \Delta b\|_2 + \alpha \|\Delta x\|_2^2 \quad (3)$$

dengan  $\|\cdot\|_2$  adalah L2 norm dari sebuah vektor,  $\alpha$  adalah faktor redaman dan  $W$  adalah matrik bobot.

Menurut Marquardt [9], faktor redaman akan mengontrol arah nilai  $\Delta x$  dan kekonvergenan dari suatu model. Kemudian faktor redaman juga juga mengontrol model dalam ruang dimensi pemodelan [10]. Dengan memilih nilai faktor redaman yang tepat, kita dapat meningkatkan kecepatan pemrosesan inversi dan menjamin konvergensi inversi yang stabil pada persamaan (2). Dalam prakteknya, beberapa nilai yang berbeda untuk  $\alpha$  perlu mencoba untuk mencari faktor redaman yang tepat dengan menggunakan teknik dekomposisi tunggal sehingga dapat meminimalkan nilai yang memungkinkan faktor redaman tanpa harus menghitung ulang inversi matriks dari  $(A^T A + \alpha I)$ , dengan  $A = LJ$ , yang solusinya adalah:

$$\Delta x = V(\Lambda^2 + \alpha I) - 1 \Lambda U^T d \quad (4)$$

dengan  $d = Lb$ ,  $I$  adalah matriks identitas, dan  $L$  merupakan diagonal matrik.

Tingkat kepercayaan dari model (resolusi) yang dihitung melalui persamaan (4) sangat susah untuk ditentukan karena proses inversi matriks  $[V(\Lambda^2 + \alpha I)^{-1} \Lambda U^T]$  merupakan fungsi dari faktor redaman. Model parameter dapat sepenuhnya diselesaikan hanya saat faktor redaman sama dengan nol. Di sisi lain, nilai varian dalam parameter model akan meningkat ketika nilai faktor redaman berkurang. Dalam praktiknya, resolusi parameter model bisa dianalisis dengan meminimalkan kurva *trade-off* antara resolusi dari model dan varian dari model parameter.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Kecepatan gelombang sekunder,  $V_s$ , yang dominan pada gelombang permukaan (Rayleigh) diasumsikan untuk kasus bumi yang berlapis [11]. Pada kasus ini, kecepatan fase gelombang sekunder dengan fungsi kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ )

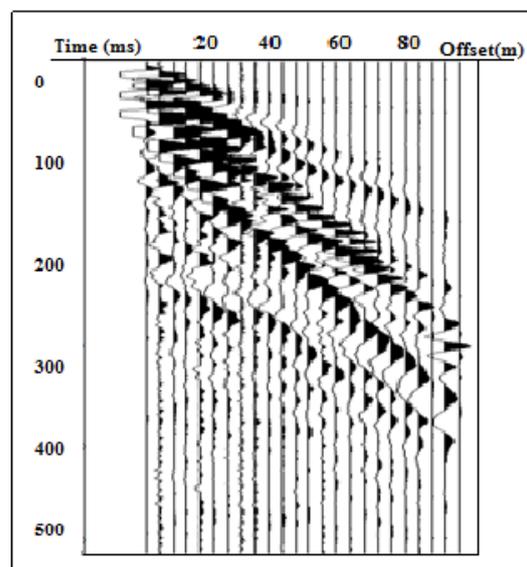
terhadap kedalaman dapat diturunkan dengan mendispersi kecepatan fase permukaan gelombang Rayleigh [12,13].

Data rekaman gelombang seismik berupa gambaran rekaman penjalaran gelombang gelombang fungsi waktu untuk masing-masing *geophone* yang terekam pada peralatan seismik ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan fungsi kecepatan gelombang sekunder pada gelombang permukaan (Rayleigh), rekaman gelombang seismik yang berjumlah 576 data diolah untuk mendapatkan kurva dispersi melalui Fast Fouries Tranform (FFT) dan untuk mendapatkan struktur lapisan bawah permukaan melalui proses inversi kurva dispersi.

Pada Gambar 5, diperlihatkan salah satu kurva dispersi yang diperoleh pada penelitian ini. Pada Gambar 5 telah dilakukan proses pemilihan (*picking*) nilai kecepatan fase dan frekuensi guna mendapatkan response penjalaran gelombang seismik dibawah permukaan. Proses *picking* yang dilakukan untuk mendapatkan kurva yang akurat melalui pengamatan amplitude spektum gelombang (energi) yang dominan dan meminimalisir *noise* yang ada saat pengambilan data di lapangan.

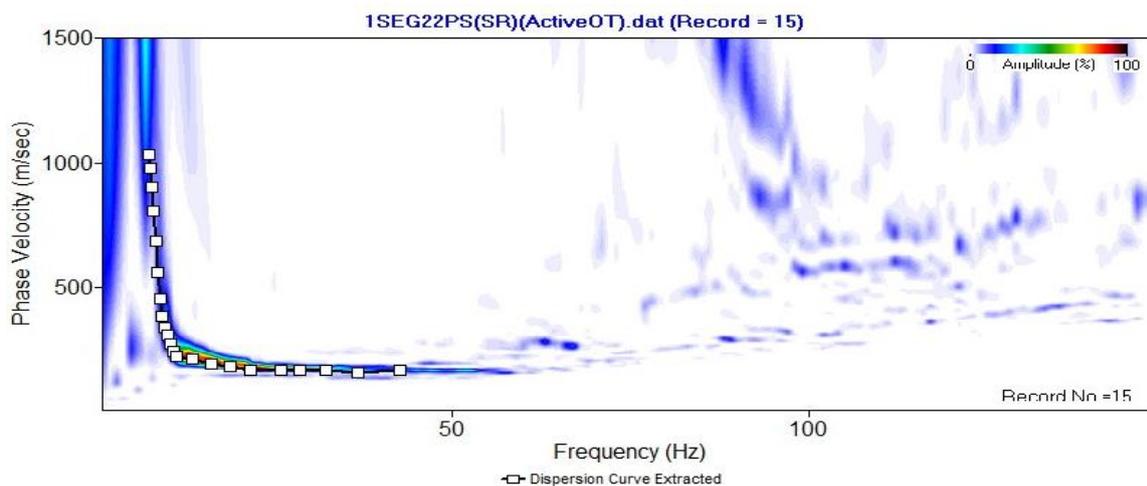
Gambar 5 juga menjelaskan bahwa saat proses *picking* frekuensi yang digunakan untuk *input* model inversi hanya menggunakan *fundamental mode* ( $M_0$ ) atau frekuensi natural saja. Hal ini dilakukan untuk untuk memastikan energi awal dari sumber getaran yang diberikan yang sampai ke penerima (*geophone*).

Dari Gambar 5, dapat diketahui bahwa kecepatan fase berbanding terbalik dengan nilai frekuensi. Saat nilai frekuensi relatif kecil, kecepatan fasenya mengalami kenaikan, hal itu

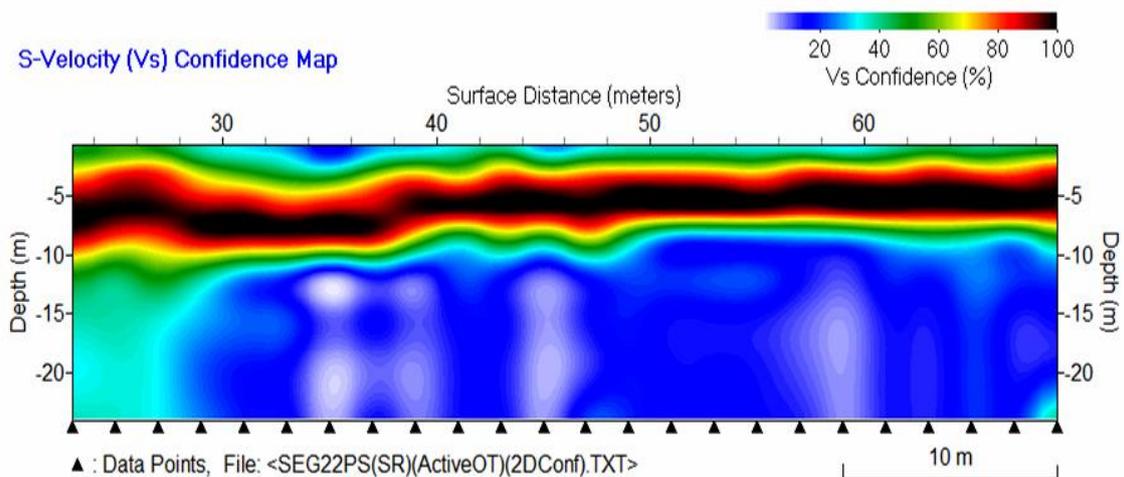


**Gambar 4.** Contoh rekaman gelombang seismik.

menunjukkan bahwa tingkat kekerasan batuan di bawah permukaan mengalami perbedaan untuk tiap lapisan bawah permukaan. Reprersetasi nilai persentasi spektrum energi gelombang seismik berada pada level 0-100%, akan tetapi proses pemilihan dilakukan hanya pada energi yang sangat signifikan saja (> 60%) pada frekuensi < 50 Hz dengan kecepatan fase maksimum 500 m/s. Hasil inversi dari 24 kurva dispersi dari 24 kali akuisisi data seismik diperlihatkan pada Gambar 6. Dapat dilihat secara umum bahwa hasil pemetaan nilai kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) merupakan fungsi kedalaman. Dari Gambar 6, dapat dijelaskan bahwa profil struktur bawah permukaan dapat terlihat sampai kedalaman 8 m dengan panjang bentangan antara 20-72 m. Dari Gambar 6 dapat dijelaskan bahwa semakin besar nilai  $V_s$  maka struktur bawah permukaannya tergolong padat (keras).



**Gambar 5.** Contoh kurva dispersi yang telah diperoleh dari rekaman gelombang seismik.



**Gambar 7.** Profil 2D tingkat kepercayaan dari hasil model struktur bawah permukaan.

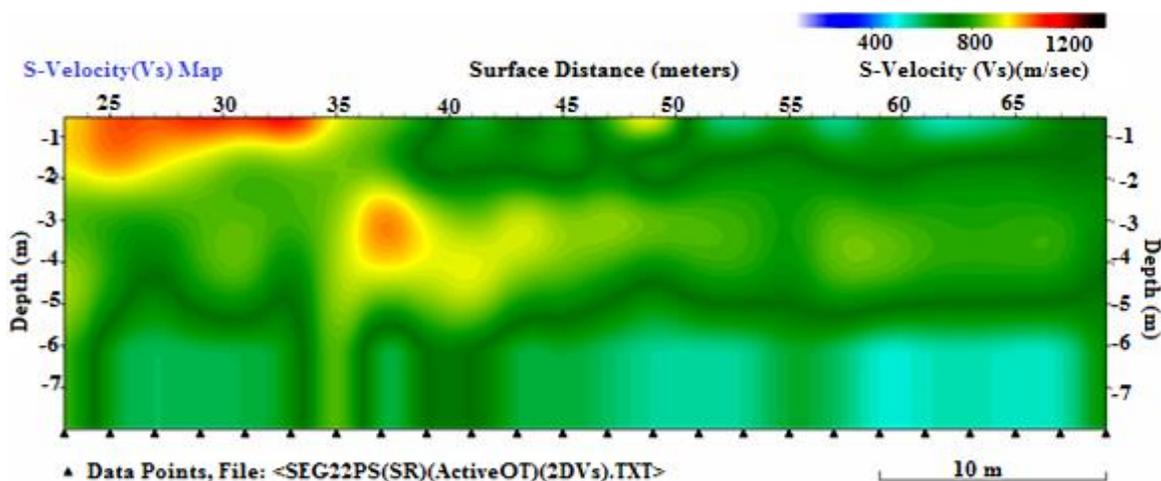
Dari profil 2D pada Gambar 6, diketahui bahwa struktur bawah permukaan pada daerah penelitian tidak padat dan diduga sebelumnya merupakan tanah yang rawa yang kemudian dilakukan penimbunan dengan kedalaman >5 m dan nilai Vs berada pada interval 400-500 m/s. Pada kedalaman 1-4 m, nilai Vs relatif lebih besar dengan warna merah-kuning pada profil 2D. Hal ini diduga dikarenakan di bawah struktur permukaan pada kedalaman tersebut merupakan tanah dengan struktur batuan yang lebih keras atau merupakan batuan yang tertimbun saat proses penimbunan pada lokasi penelitian saat pendataran lokasi (Gambar 2).

Hasil penelitian profil 2D struktur bawah permukaan (Gambar 6) pada kedalaman 4-10 m mempunyai resolusi yang sangat baik, yakni antara 80-100% (Gambar 7). Hal ini mengindikasikan nilai penelitian mendekati nilai sebenarnya dan dapat

dipercaya sebagai informasi awal untuk menduga struktur lapisan bawah permukaan pada daerah penelitian yang telah dilakukan. Pada Gambar 7, dapat dijelaskan bahwa hasil struktur lapisan bawah permukaan yang diperoleh secara umum dapat dipercaya untuk kedalaman yang diinginkan (< 10 m).

Sebaliknya, pada kedalaman > 10 m tingkat kepercayaan model yang telah dibuat relatif lebih kecil, dengan selang kepercayaan dibawah 50%. Hal itu dikarenakan *geophone* tidak dapat merekam gelombang permukaan dari sumber getaran dengan baik karena penetrasi energi gelombang yang berkurang terhadap kedalaman.

Dari hasil data penelitian yang telah diolah, dapat dijelaskan bahwa struktur bawah permukaan pada lokasi yang penelitian atau lokasi yang nantinya akan dibangun rumah sakit Muhammadiyah Bengkulu, pada kedalaman lebih



**Gambar 6.** Profil 2D struktur bawah permukaan pada daerah yang telah diteliti. Warna yang dihasilkan pada profil 2D, yaitu berwarna pada selang warna biru dengan nilai Vs yang relatif kecil menuju warna merah dengan nilai Vs yang lebih besar.

dari 7 m dengan nilai  $V_s$  sekitar 400-500 m/s merupakan tanah dengan tingkat kekerasan yang rendah (katagori batuan lunak). Hal ini diduga dulunya daerah yang diteliti merupakan tanah rawa kemudian dilakukan penimbunan dan pengerasan dengan alat berat sehingga secara penampakan pada permukaan bumi terlihat lebih keras (Gambar 2). Pada kedalaman 1-5 m, nilai  $V_s$  yang diperoleh sekitar 800-1200 m/s yang merupakan tanah dengan tingkat kekerasan yang kompak karena memiliki kecepatan gelombang sekunder ( $V_s$ ) yang lebih besar, dan diduga merupakan batuan keras. Menurut standar SNI 1726, Badan Standardisasi Nasional tahun 2012 [14], katagori tanah pada kondisi  $V_s$  800-1200 m/s merupakan klasifikasi batuan.

Kemudian, hasil akhir yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 6. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin dalam lapisan bawah permukaan, nilai  $V_s$  relatif semakin kecil. Hasil ini berbanding terbalik dari teori secara umum bahwa semakin ke bawah permukaan pada kulit bumi, semakin tinggi pula nilai  $V_s$ . Penemuan pada penelitian ini hanya bersifat lokal yang mungkin dipengaruhi oleh material yang lebih lunak bawah permukaan karena sebelumnya merupakan tanah rawa dan tertimbun oleh material karena proses pendataran pada lokasi penelitian.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tentang struktur bawah permukaan di lokasi yang akan dibangun rumah sakit Muhammadiyah Bengkulu di wilayah Tugu Hiu, Kota Bengkulu dapat disimpulkan bahwa nilai  $V_s$  berada pada kisaran 400-1200 m/s dengan tingkat kepercayaan antara 80-100% pada kedalaman < 10 m. Secara umum, juga dapat disimpulkan bahwa struktur bawah permukaan pada daerah penelitian terdiri dari dua katogori utama yakni klasifikasi batuan dengan nilai  $V_s$  yang diperoleh sekitar 800-1200 m/s dan batuan lunak dengan nilai  $V_s$  sekitar 400-500 m/s merupakan daerah yang tidak kuat karena tanahnya tidak memiliki tingkat kekerasan yang kompak (padat), khususnya pada kedalaman > 7 m dan diduga merupakan daerah rawa yang merupakan timbunan. Dari hasil penelitan ini disarankan saat penancangan pondasi bangunan haruslah sampai pada kedalaman > 10 m. Hal ini dilakukan agar pondasi yang dibuat dapat menahan bangunan apabila terjadi getaran saat gempa bumi terjadi.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak ke pada mahasiswa Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Bengkulu yang telah membantu pengambilan data di lapangan. Ucapan terima kasih banyak juga kami sampaikan kepada Laboratorium Fisika, FMIPA, Universitas Bengkulu yang telah memfasilitasi peralatan seismik PASI 16S24-P dan peralatan lainnya.

#### Daftar Pustaka

- [1] Abercrombie, R. E, Antolik, M and Ekström, G., The June 2000 Mw 7.9 earthquakes south of Sumatra: Deformation in the India–Australia Plate, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108 (B1), pp.ESE6 1-16, 2003.
- [2] Zhou, Y., Xu, L. and Chen, Y., Source Process of the 4 June 2000 Southern Sumatra, Indonesia, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5), pp.2027-2035, 2002.
- [3] Zhou, Y., Xu, L. and Chen, Y., Mechanism of the June 4, 2000 Southern Sumatra, Indonesia, earthquake, *Acta Seismologica Sinica*, 15(5), pp.484-492, 2002.
- [4] Lubis A.M., Hashima, A., Sato, T., Analysis of afterslip distribution following the 12 September 2007 southern Sumatra earthquake using poroelastic and viscoelastic media, *Geophysical Journal International*, 192 (1), pp.18-37, 2013.
- [5] Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., *Applied Geophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press, pp.1-770, 1990.
- [6] Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J., Multichannel analysis of surface waves (MASW), *Geophysics*, 64 (3), pp.800-808, 1999.
- [7] Xia, J., Miller, R. D. and Park, B. C., Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves, *Geophysics*, 64(3), pp.691-694, 1999.
- [8] Levenberg, K., A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares: *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, pp.164-168, 1944.
- [9] Marquardt, D.W., An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp.431-441, 1963.
- [10] Tarantola, A., *Inverse problem theory, Methods for data fitting and model parameter estimation*, Elsevier Science Publ. Co., Inc., pp.1-644, 1987.
- [11] Nazarian, S., Stokoe, K. H., II, and Hudson, W. R., Use of spectral analysis of surface waves

- method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems, Transportation Research Record, 930, pp.38-45, 1983.
- [12] Dorman, J., and Ewing, M., Numerical inversion of seismic surfacewave dispersion data and crust-mantle structure in the NewYork-Pennsylvania area, Journal of Geophysical Research, 67, pp.5227-5241, 1962.
- [13] Aki, K., and Richards, P.G., Quantitative seismology: Theory and Method, 1<sup>st</sup> ed., W.H. Freeman & Co. Geophysics, pp.1-700, 1980.
- [14] Badan Standardisasi Nasional, ata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, SNI 1726:2012, 2012.