

## Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen dengan Metode Seismik Aktif MASW di Daerah Teluk Sepang, Bengkulu

### *Estimation of Sedimentary Layer by MASW Active Seismic Method in Teluk Sepang Area, Bengkulu*

Tedy Al Gozali, Elfi Yuliza, dan Ashar Muda Lubis

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Bengkulu, Jalan. W.R. Supratman  
Kandang Limun, Kota Bengkulu, 38122 Indonesia

e-mail: asharm1@unib.ac.id

Naskah diterima 15 November 2024, selesai direvisi 7 Maret 2025 dan disetujui 28 April 2025

#### ABSTRAK

Teluk Sepang memiliki potensi tinggi terhadap bahaya gempa bumi karena kedekatannya dengan zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Tingkat kerusakan akibat gempa tidak hanya tergantung pada magnitudo, tetapi juga kondisi geologi, terutama keberadaan lapisan bawah permukaan yang lunak atau berpasir yang dapat memperkuat getaran. Penelitian ini bertujuan mendukung mitigasi bencana gempa dalam pembangunan berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) untuk mendapatkan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) lapisan bawah permukaan. Data diambil dengan seismograph digital PASI 16824P menggunakan 24 geophone, bentangan 50 m, offset 4 m, dan spasi 2 m. Perekaman data selama 512 ms dengan interval sampel 125  $\mu$ s, pengambilan data di lokasi berbeda menggunakan palu sebagai sumber seismik, dengan 3 kali perulangan serta gelombang Rayleigh memiliki frekuensi 1-50 Hz. Nilai  $V_s$  divisualisasikan dalam kontur warna dan diinterpretasi dengan perangkat lunak WINMASW. Model 1D yang diperoleh diklasifikasikan berdasarkan tabel jenis situs dan dimodelkan secara 2D untuk gambaran bawah permukaan lebih komprehensif. Berdasarkan  $V_s$ , daerah diklasifikasikan menjadi empat kelompok: tanah lunak dan sedang ( $V_s$  100–300 m/s pada kedalaman 10–20 m), tanah keras dan batuan lunak ( $V_s$  300–700 m/s pada kedalaman 10–20 m), serta batuan sedang ( $V_s$  700–1500 m/s pada kedalaman 20–30 m). Variasi ini menunjukkan tingkat kerentanan seismik yang berbeda. Rekomendasi hasil penelitian penting untuk mitigasi gempa, termasuk penguatan bangunan dan penataan ruang berbasis risiko.

**Kata kunci:** Gelombang Geser, Ketebalan Sedimen, Klasifikasi Situs, MASW

#### ABSTRACT

Teluk Sepang has a high potential for earthquake hazard due to its proximity to the subduction zone between the Indo-Australian Plate and the Eurasian Plate. The extent of earthquake damage depends not only on the magnitude, but also on geological conditions, especially the presence of soft or sandy subsurface layers that can amplify vibrations. This research aims to support earthquake disaster mitigation in sustainable development. The method used is Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) to obtain the shear wave velocity ( $V_s$ ) of the subsurface layer. Data were taken with a PASI 16824P digital seismograph using 24 geophones, 50 m stretch, 4 m offset, and 2 m spacing. Data recording for 512 ms with a sample interval of 125  $\mu$ s, data collection at different locations using a hammer as a seismic source, with 3 repetitions and rayleigh waves having a frequency of 1-50 Hz. The  $V_s$  values were visualised in colour contours and interpreted with WINMASW software. The obtained 1D models were classified based on the site type table and modelled in 2D for a more comprehensive subsurface view. Based on  $V_s$ , the area was classified into four groups: soft and medium soil ( $V_s$  100-300 m/s at 10-20 m depth), hard soil and soft rock ( $V_s$  300-700 m/s at 10-20 m depth), and medium rock ( $V_s$  700-1500 m/s at 20-30 m depth). These variations indicate different levels of seismic vulnerability. The research recommendations are important for earthquake mitigation, including building strengthening and risk-based spatial planning.

**Keywords:** Shear Wave, Sediment Thickness, Site Classification, MASW

## PENDAHULUAN

Kota Bengkulu berada tepat di atas kawasan subduksi Lempeng Eurasia dan Indo Australia dengan pergerakan cukup besar. Pergerakan lempeng ini mengakibatkan tingginya frekuensi gempa bumi tektonik yang terjadi di Kota Bengkulu. Data historis menunjukkan bahwa Kota Bengkulu sering terjadi gempa bumi dengan kekuatan di atas 7 SR (Murtianto, Malik dan Fachri., 2022). Kejadian gempa bumi ini berkaitan dengan letak Kota Bengkulu pada dua patahan aktif yakni patahan Mentawai dan Patahan Semangko. Keduanya termasuk dalam zona sesar geser yang dikenal sebagai patahan Semangko, wilayah ini berisiko mengalami kerusakan akibat gempa, bahkan jika gempa tersebut memiliki magnitudo yang relatif kecil. Salah satu daerah yang berdampak akibat kejadian gempa bumi di Kota Bengkulu adalah Teluk Sepang.

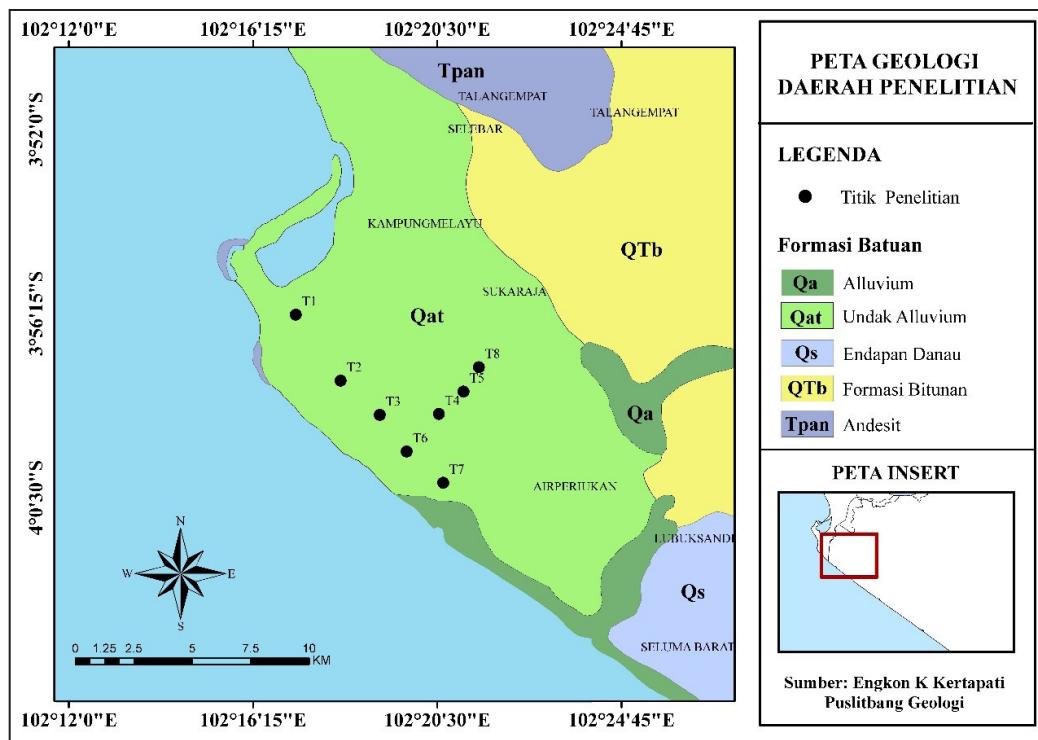
Teluk Sepang terletak di wilayah yang rawan gempa karena berada dekat dengan zona subduksi, tempat dua lempeng tektonik bertemu, yaitu Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Ketegangan dan pergerakan di zona subduksi ini menjadi penyebab utama gempa bumi yang sering terjadi di wilayah Bengkulu dan sekitar Seluma (Khoirillia, 2023). Selain itu, keberadaan sesar aktif seperti Sesar Mentawai, Ketahun, Musi dan Manna, berkontribusi pada kejadian gempa lokal di wilayah Bengkulu. Lebih lanjut di daerah Teluk Sepang dan sekitarnya mengalami kejadian gempa yang bersifat dangkal dan cukup kuat, meskipun tidak menimbulkan kerusakan besar. Kerusakan akibat gempa bumi terjadi akibat gelombang gempa bumi yang dahsyat dan struktur bawah permukaan yang lunak atau berpasir yang cenderung memperkuat getaran gempa, sehingga bangunan di atasnya lebih rentan roboh (Arifudin 2018).

Secara umum, terdapat dua kali kejadian gempa bumi besar di wilayah Bengkulu selama dua puluh tahun terakhir, yaitu pada tahun 2000 dengan magnitudo momen (Mw) 7,9 dan tahun

2007, magnitudo momen (Mw) meningkat menjadi 8,4. Seiring dengan perkembangan perekonomian dan pertumbuhan penduduk berbagai kawasan di Kota Bengkulu terus mengalami peningkatan signifikan dalam aktivitas pembangunan di berbagai sektor, terutama di bidang infrastruktur, termasuk perluasan kawasan permukiman dan pengembangan sarana serta prasarana fasilitas umum lainnya. Oleh karena itu, upaya mitigasi untuk menekan risiko kejadian gempa bumi perlu dilakukan. Lebih lanjut, dalam kajian teknik kegempaan, risiko yang lebih tinggi akan terjadi pada daerah dengan lapisan sedimen yang lebih besar apabila digoncang gelombang gempa bumi (Handoyo drr, 2022; Lubis drr, 2022).

Dalam mengurangi risiko yang dapat ditimbulkan di daerah rawan kejadian gempa bumi, pembangunan infrastruktur harus mempertimbangkan kondisi geologi setempat termasuk di daerah Teluk Sepang. Struktur bangunan yang didirikan harus memiliki pondasi yang kuat dan menggunakan bahan material yang sesuai dengan karakteristik batuan lokal (Usman 2014). Berdasarkan peta geologi regional (Gambar 1) daerah Teluk Sepang didominasi oleh Undak Alluvium. Oleh karena itu, penelitian mengenai formasi geologi Teluk Sepang dan ketahanan batuan terhadap gempa sangat penting dalam upaya mitigasi bencana dan perencanaan pembangunan yang *sustainable development*.

Penelitian ini menggunakan metode Multi-channel Analysis Surface Waves (MASW), metode ini digunakan untuk pemetaan bawah permukaan, memungkinkan karakterisasi yang akurat terhadap sifat tanah, struktur geologi, dan kedalaman batuan dasar (Handoyo drr, 2022; Lubis drr, 2022). Penelitian mengenai struktur bawah permukaan di wilayah Teluk Sepang sangat penting untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai karakteristik struktur tanah, kekuatan tanah, serta kerentanannya terhadap guncangan gempa bumi di daerah tersebut. Upaya ini dilakukan sebagai bagian dari strategi mitigasi bencana gempa bumi dalam rangka mendukung pembangunan



Gambar 1. Peta geologi regional lokasi penelitian (Sumber: Engkon K Kertapati Puslitbang Geologi).

yang berkelanjutan. Informasi tentang ketebalan lapisan sedimen pada suatu daerah sangat perlu untuk diketahui agar dapat menjadi acuan dalam merencanakan suatu bangunan yang tahan terhadap gempa (Puspitafuri drr., 2021).

Penelitian mengenai identifikasi struktur bawah permukaan telah dilakukan oleh Lubis drr, (2020) menggunakan metode geofisika *Multichannel Analysis Surface Wave* (MASW) di lokasi pembangunan Rumah Sakit Muhammadiyah Kota Bengkulu. Berdasarkan hasil interpretasi data, struktur bawah permukaan yang terletak pada proyek pembuatan Rumah Sakit Muhammadiyah Kota Bengkulu dapat dikelompokkan dalam dua jenis utama, yaitu batuan keras dengan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) yang berkisar antara 800–1200 m/s, sedangkan batuan lunak dengan nilai  $V_s$  400–500 m/s. Lapisan batuan lunak ini cenderung memiliki tingkat kekompakan yang rendah, terutama pada kedalaman >7 meter, yang mengindikasikan karakteristik tanah yang kurang stabil. Berdasarkan penelitian (Lubis drr., 2020), kondisi tersebut diduga merupakan

hasil dari proses penimbunan pada lahan yang sebelumnya merupakan daerah rawa.

Tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa bumi tidak hanya dipengaruhi oleh mekanisme gempa itu sendiri, tetapi juga dipengaruhi oleh karakteristik struktur bawah permukaan dan ketebalan sedimen di wilayah tersebut (Lubis drr., 2021). Area yang mempunyai nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi menunjukkan bahwa itu merupakan wilayah yang rentan mengalami kerusakan dan pergeseran tanah (Dewi, Maison, dan Risa, 2023). Litologi yang cukup lunak memiliki risiko yang lebih tinggi saat digoncang gelombang gempa bumi, karena cenderung mengalami penguatan (amplifikasi) gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan batuan yang lebih padat (Kamawan, Marijono, dan Soehaimi, 2010).

Gambar 1 menampilkan peta geologi regional Kota Bengkulu dan sekitarnya yang terdiri dari Alluvium, Undak Alluvium, Endapan Danau, Formasi Bintunan (QTb) serta Andesit (Tpan) yang dominan terdiri dari batuan beku dan konglomerat. Kemudian Formasi Undak

Alluvium (Qat) yang didominasi oleh lanau, lempung, pasir, dan campuran kerikil. Selain itu, Formasi Endapan Alluvium (Qa) dan Batu Gamping Terumbu Karang (QI) mencakup, lempung, lanau, lumpur, pasir, dan kerikil. Sementara itu, Formasi Endapan Danau (Qs) yang terletak di bagian timur dan utara Kota Bengkulu terdiri dari lumpur, tanah liat, dan pasir (Gambar 1). Kawasan Kota Bengkulu mempunyai potensi gempa yang cukup tinggi karena kondisi tektonik dan geologinya.

Dengan aktivitas tektonik yang masih tinggi di wilayah ini, masyarakat di Teluk Sepang, Bengkulu secara umum tetap harus waspada terhadap potensi gempa bumi yang bisa terjadi kapan saja. Oleh karena itu, penelitian ini sangat penting untuk memberikan informasi kepada masyarakat dan pemerintah Kota Bengkulu mengenai struktur batuan bawah permukaan dan mitigasi bencana terhadap bahaya gempa bumi untuk meminimalisir dampak dari gempa bumi yang terjadi.

Secara tektonik, Teluk Sepang terletak pada *fore arc basin* yang terdampak aktivitas tektonik. Daerah penelitian ini terletak diantara dua sistem sesar, yaitu sesar sumatera timur dan sesar mentawai barat. Pada titik penelitian yang dilakukan, formasi batuan didominasi oleh endapan Undak Alluvium, dimana endapan ini merupakan batuan endapan permukaan seperti sungai, pantai, dan rawa yang tersusun oleh lanau, pasir, lempung, dan kerikil (Juwita., 2022).

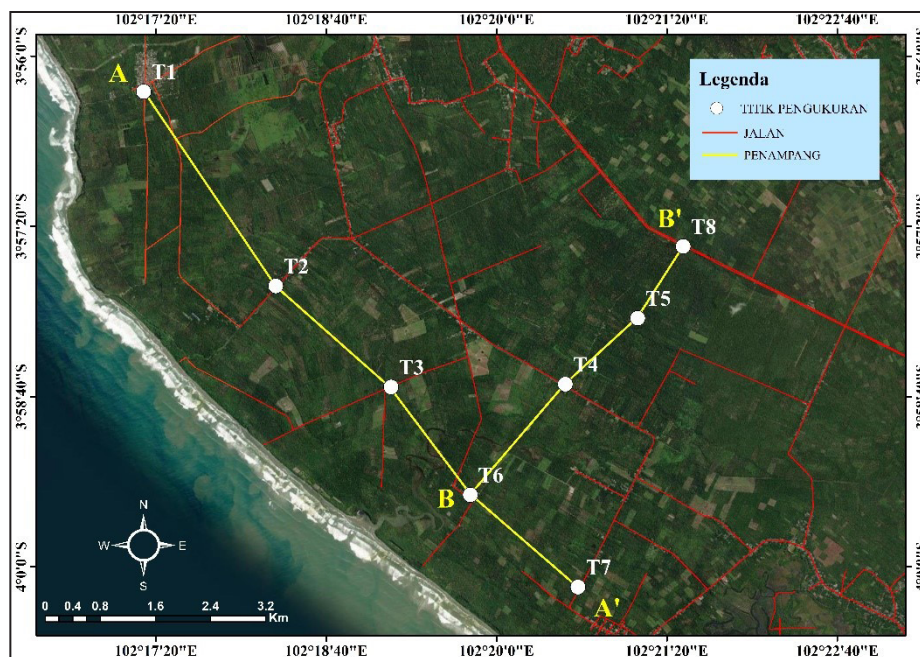
## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Teluk Sepang, Provinsi Bengkulu dengan 8 lokasi titik pengukuran MASW yang dibuat menjadi 2 penampang seperti pada Gambar 2. Pemilihan titik pengukuran mewakili variasi kondisi yang bisa memberikan hasil yang representatif wilayah penelitian meskipun jumlahnya terbatas. Lokasi pengukuran disesuaikan dengan karakteristik lapangan, seperti kontur datar, minim getaran, dan tanah kering. Jarak antar titik pengukuran adalah 2 Km, dimana pengambilan jarak mem-

pertimbangkan kondisi area penelitian berupa kebun sawit dan rawa yang sulit diakses.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *Multichannel Analysis Surface Wave* (MASW), yang terdiri dari tiga tahapan yang sangat penting, yakni akuisisi data seismik, analisis dispersi, dan inversi kurva dispersi (Meilita, 2019). Pengambilan data menggunakan alat seismograph digital PASI 16824P dengan 24 *geophone* yang memiliki panjang bentangan 50 m, dan *offset* 4 m dengan spasi 2 m serta jumlah shot 3 kali percobaan di lokasi yang berbeda. Dalam proses akuisisi, sumber seismik dilakukan dengan menggunakan palu (*hammer source*) yang dipukulkan ke plat logam untuk menghasilkan gelombang seismik yang kemudian direkam oleh semua *geophone*. Gelombang Rayleigh yang direkam memiliki frekuensi antara 1-50 Hz. Oleh karena itu, *geophone* yang digunakan harus memiliki frekuensi resonansi lebih rendah dari frekuensi minimum gelombang rayleigh yang ingin dianalisis, untuk menghindari pemotongan sinyal. Total catatan durasi pengambilan data seismik untuk setiap pengukuran adalah 512 ms dengan interval sampel sebesar 125  $\mu$ s. Waktu perekaman perlintasan diestimasi selama 30 menit untuk 1 bentangan. Sedangkan rekaman yang dihasilkan dari sumber getaran yang berbeda akan diukur dan dicatat oleh *geophone* (Laksono dan Rasimeng, 2017).

Untuk mengumpulkan hasil pengukuran yang akurat (sedikit *noise*) yang bersumber dari *shotgather* maka titik penelitian sebaiknya jauh dari jalan raya atau kerumunan. Data yang akurat (sedikit *noise*) ditandai dengan gelombang permukaan rayleigh yang tampak jelas dan konsisten di seluruh *geophone*, serta rasio *signal-to-noise* yang tinggi. Selain itu, data yang bersih dari gangguan gelombang permukaan maupun getaran buatan lainnya akan sangat mendukung proses interpretasi yang lebih akurat dan dapat diandalkan. Data yang diperoleh pada *shotgather* yang minim *noise* akan terlihat seperti grafik gelombang yang tercatat pada tiap-tiap *geophone* (Gambar 3).

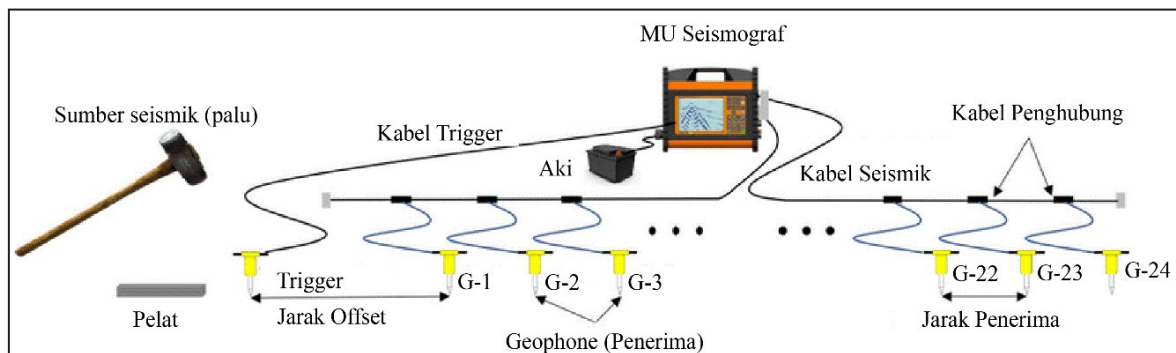


Gambar 2. Peta titik lokasi pengukuran MASW.

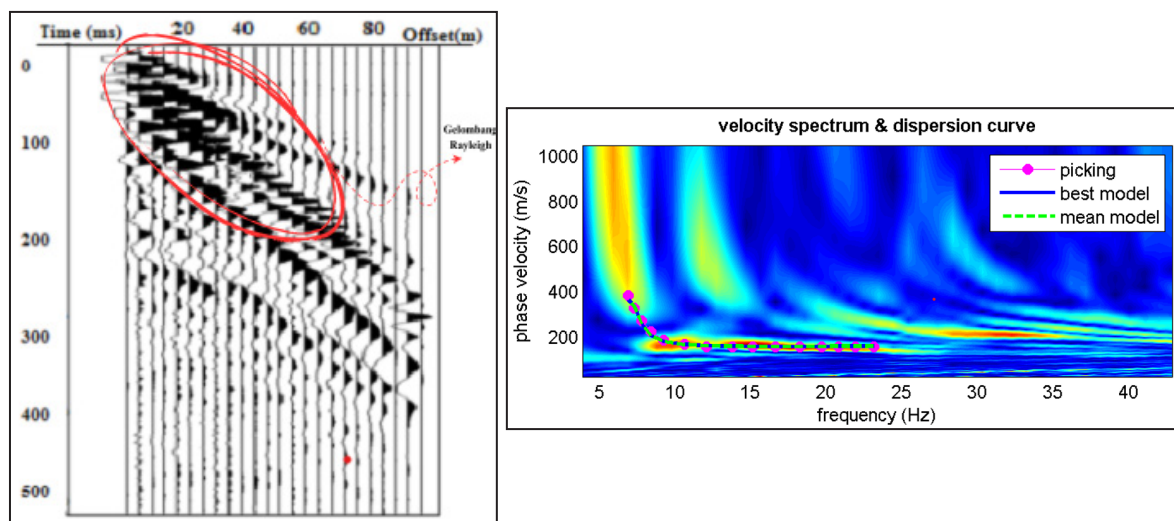
Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak WinMASW *Professional* 5.0 untuk memperoleh nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) hingga kedalaman 30 meter. Hasil pengolahan data disajikan dalam bentuk model 1D dan 2D berdasarkan interpolasi nilai  $V_s$ . Sebelum dianalisis lebih lanjut, data lapangan terlebih dahulu di *filter* menggunakan *low-pass* filter untuk menghilangkan *noise* yang memiliki frekuensi tinggi agar diperoleh sinyal utama yang diinginkan, biasanya berada di frekuensi rendah sampai menengah Selanjutnya, dilakukan proses *picking* untuk menghasilkan kurva dispersi yang menggambarkan hubungan antara kecepatan fasa dan frekuensi gelombang

dengan menggunakan perangkat lunak WinMASW *Professional* 5.0.

Gelombang *Rayleigh* adalah sumber daya yang digunakan pada metode MASW dan gelombang ini memiliki amplitudo tinggi seperti pada Gambar 4a (Zakaria, 2018). Dispersi gelombang permukaan *Rayleigh* diperoleh melalui pengolahan data *time series* gelombang seismik yang didapatkan dari pengukuran transformasi ke dalam domain frekuensi (Handoyo 2023). Transformasi Fourier adalah metode untuk mengubah sinyal dari domain waktu (atau ruang) ke domain frekuensi. Penggunaan Transformasi Fourier memungkinkan untuk memecahkan sinyal kompleks



Gambar 3. Skema pengambilan data MASW.



Gambar 4. a) Rekaman gelombang seismic. b) Kurva dispersi yang diperoleh berasal dari rekaman gelombang seismic.

menjadi gabungan sinyal sinusoidal sederhana (gelombang dengan frekuensi tertentu). Setiap komponen sinusoidal ini memiliki frekuensi, amplitudo, dan fase tertentu. Transformasi Fourier tidak mengubah bentuk fisik sinyal, tetapi menyajikan informasi yang sama dalam bentuk yang berbeda dari fungsi waktu menjadi fungsi frekuensi. Transformasi ini sangat berguna dalam pemrosesan sinyal, pengolahan citra, geofisika, dan berbagai bidang lainnya. Secara umum, bentuk persamaan Transformasi Fourier didefinisikan pada persamaan (1).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \dots\dots\dots (1)$$

dimana  $x(t)$  merupakan sinyal dalam domain waktu,  $X(f)$  adalah hasil transformasi Fourier, yaitu spektrum dalam domain frekuensi, sedangkan  $f$  adalah frekuensi (Hz). Kemudian  $j$  merupakan bilangan imajiner ( $j^2 = -1$ ), dan  $e^{-j2\pi ft}$  adalah fungsi kompleks eksponensial, mewakili sinyal sinusoidal. Setelah mendapatkan deretan kurva dispersi, langkah berikutnya adalah mengubah kurva dispersi tersebut. Untuk menghasilkan profil struktur bawah permukaan 2D, proses inversi menggunakan kurva dispersi sebagai input (Irwandi, Khaizal dan Hasya., 2021).

Gambar 4b merepresentasikan karakteristik penalaran gelombang seismic pada lapisan bawah

permukaan yang merupakan hasil dari tahapan *picking*. Proses *picking* merupakan proses pemilihan titik-titik dominan pada spektrum dispersi (hasil transformasi dari domain waktu ke domain frekuensi-kecepatan fasa) untuk kurva dispersi. Proses *picking* menghasilkan kurva yang menggambarkan hubungan antara frekuensi (Hz) dan kecepatan fasa (m/s) yang digunakan dalam inversi untuk mendapatkan nilai  $V_s$ . Proses *picking* dilakukan guna memperoleh kurva yang representatif dengan cara mengamati amplitudo gelombang (energi) yang sering muncul, sekaligus untuk meminimalkan gangguan *noise* yang berpotensi muncul selama melakukan akuisisi data di lapangan. Selain itu, dijelaskan bahwa dalam tahapan *picking*, hanya *fundamental mode*, atau frekuensi natural, yang digunakan sebagai input untuk model inversi. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi bahwa energi awal sumber getaran dapat diterima dengan jelas oleh *geophone*.

Nilai  $V_s$  dapat digunakan untuk menentukan jenis batuan, mengacu pada standar *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) dalam SNI 1726:2019 (BSN, 2019), sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Ketebalan sedimen lunak dan jenis batuan penyusun dijelaskan berdasarkan jenis batuan yang dikategorikan sesuai dengan standar NEHRP. Nilai  $V_s$  dapat digunakan untuk memastikan jenis batuan berdasarkan

tindakan gempa bumi terhadap efek lokal, dan juga sebagai dasar dalam rencana pembangunan tahan gempa (Wardaningsih dan Rahman, 2024).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan struktur bawah permukaan di daerah Teluk Sepang, Kota Bengkulu. Untuk mendapatkan struktur bawah permukaan dilakukan melalui interpretasi data seismik MASW 1D yang diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi seperti pada Tabel 1. Berdasarkan tabel klasifikasi, batuan keras berada pada nilai Vs 700-1500 m/s yang berada di kedalaman 20-30 m. Kemudian, jenis material penyusun batuan di setiap lokasi dipengaruhi oleh kondisi geologi daerah penelitian. Lebih lanjut, hasil dari setiap titik menunjukkan kedalaman, ketebalan, dan nilai *shear wave velocity* (Vs) batuan yang berbeda pada setiap lapisannya (Firdaus, Rasimeng dan Restianingsih., 2020).

Gambar 5 merupakan model 1D untuk mengetahui jenis batuan yang ada di daerah Teluk Sepang, Kota Bengkulu. Berdasarkan hasil model 1D, pada T1 memiliki struktur terdalam didominasi oleh batuan pasir, sedangkan bagian

lempung, dan pasir. Kemudian T5 memiliki struktur yang terdalam didominasi oleh pasir, sedangkan bagian atas terdiri dari kerikil pasiran. Pada pengukuran ini menunjukkan material yang signifikan disetiap titiknya. Pada T6 dan T7, memiliki litologi yang serupa yaitu memiliki struktur yang terdalam didominasi oleh batuan pasir, sedangkan bagian atas terdiri dari kerikil pasiran dan pasir. Selanjutnya untuk T8 pada memiliki struktur lapisan terdalam didominasi oleh pasir, sedangkan bagian atas terdiri dari kerikil pasiran yaitu serupa dengan T2 dan T5.

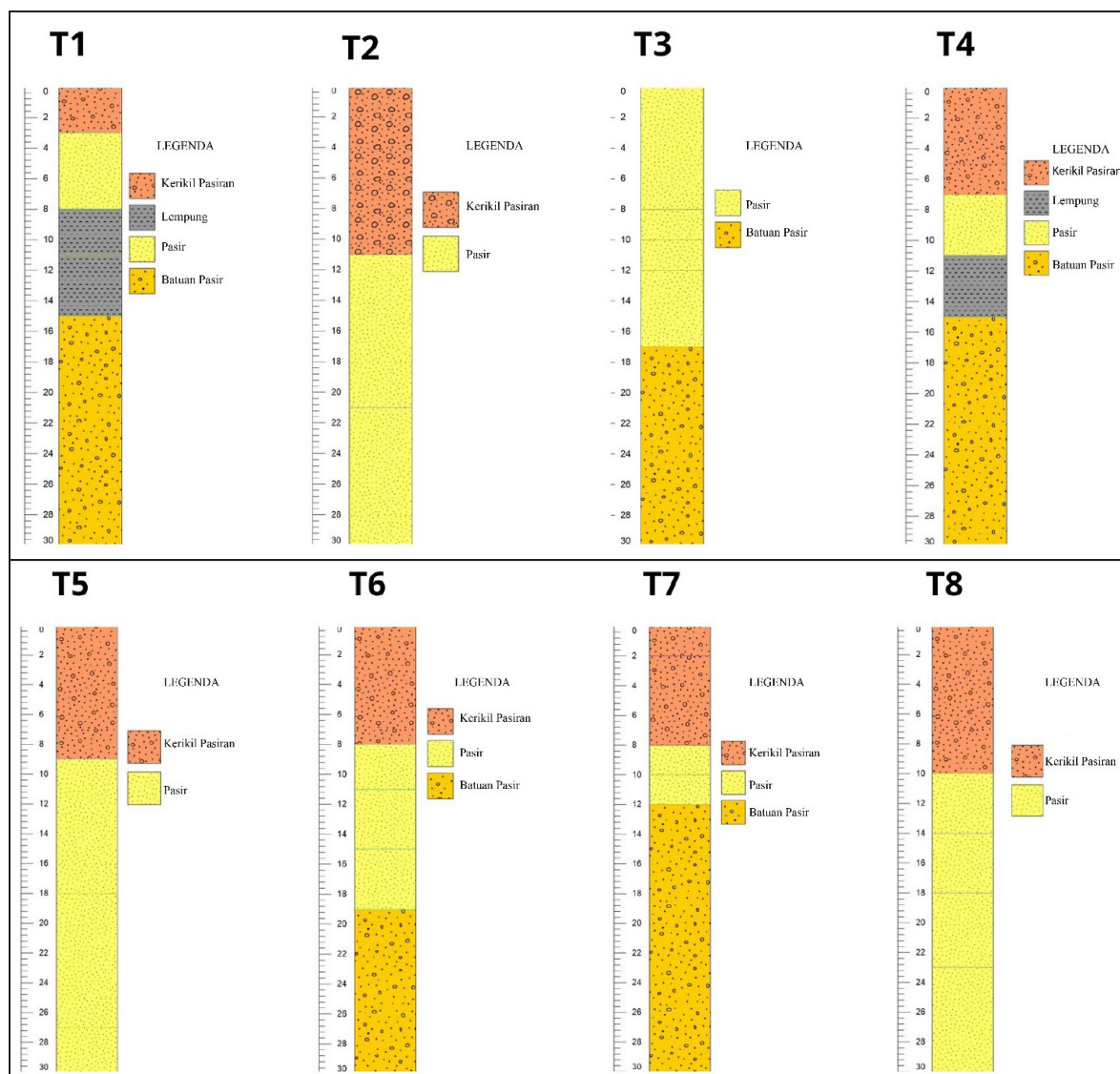
Hasil data 1D diperoleh litologi batuan per kedalaman, sehingga untuk memvisualisasikan persebaran kecepatan gelombang geser (Vs) perlu dilakukan pemodelan dalam bentuk 2D. Pemodelan ini juga memungkinkan interpretasi yang lebih detail mengenai struktur bawah permukaan. Setiap rentang nilai Vs diberikan warna kontur yang berbeda guna memudahkan pemisahan antara satu kelompok dengan kelompok lainnya (Bernard, Sugianto dan Refrizon., 2019). Interpretasi ini mempermudah pemahaman terhadap stratigrafi nilai Vs bawah permukaan di wilayah Teluk Sepang seperti ditunjukkan pada gambar 6. Berdasarkan interpretasi profil 2D yang diperoleh, dapat diidentifikasi bahwa jenis batuan pada titik T2, T3, T5, dan T8 di daerah penelitian termasuk dalam klasifikasi tanah lunak, dengan nilai Vs berkisar antara 100-300 m/s. Sebaliknya, lapisan tanah dengan jenis batuan yang lebih keras berada pada T1, T4, T6, dan T7 dengan nilai Vs berkisar antara 300-1500 m/s.

Kondisi bawah permukaan di area penelitian diketahui memiliki tingkat kepadatan yang rendah, karena wilayah tersebut didominasi oleh daerah rawa dan berada di sepanjang pesisir sehingga keberadaan endapan batuan tersusun dari pasir, lanau, lempung, napal, dan kerikil. Berdasarkan nilai Vs, daerah penelitian tergolong empat jenis batuan yaitu, tanah lunak, tanah sedang, tanah keras dan batuan lunak serta batuan sedang. Variasi nilai tanah lunak dan tanah sedang dengan nilai Vs 100-300 m/s pada kedalaman 0-10 m, nilai Vs yang tergolong rendah, seperti yang ditunjukkan

Tabel 1. Klasifikasi Kelas Situs Tanah berdasarkan SNI tahun 1726 – 2019 (BSN, 2019)

| Tipe Batuan | Jenis Batuan                 | Nilai Vs (m/s) |
|-------------|------------------------------|----------------|
| A           | Batuan Keras                 | >1500          |
| B           | Batuan Sedang                | 750-1500       |
| C           | Tanah Keras dan Batuan Lunak | 350-750        |
| D           | Tanah Sedang                 | 175-350        |
| E           | Tanah Lunak                  | <175           |

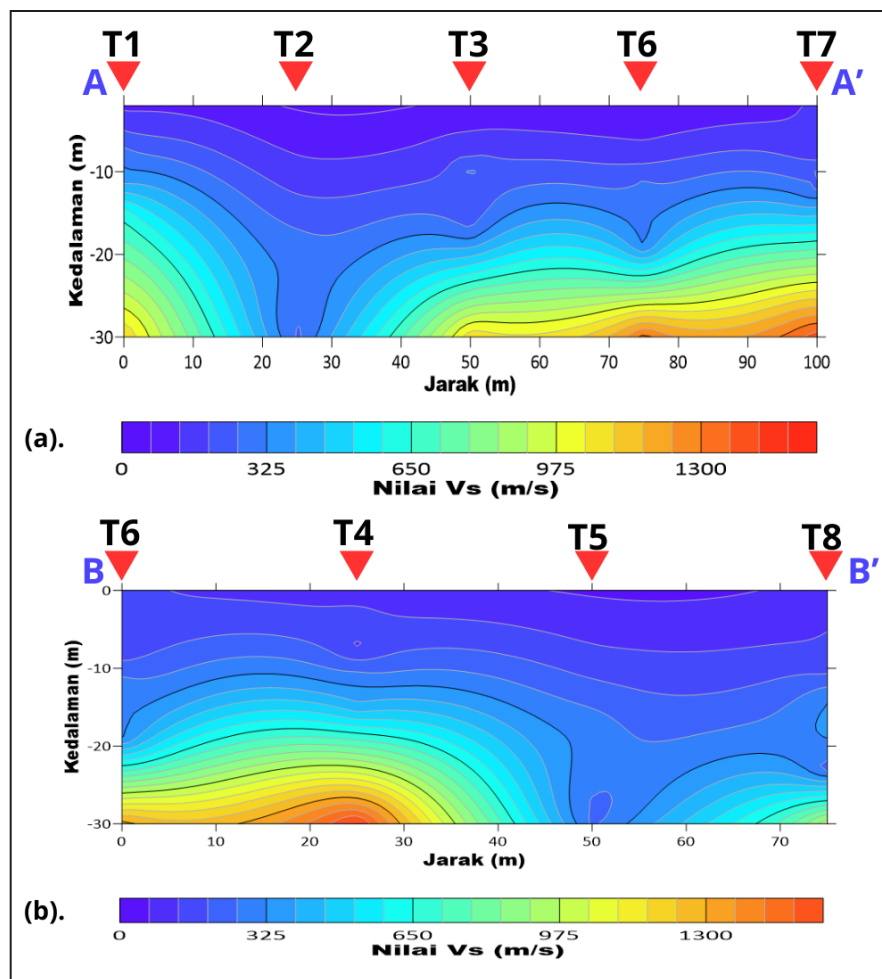
atas terdiri dari kerikil pasiran, lempung, dan pasir. Pada T2, memiliki struktur pasir dan kerikil pasiran. Pada T3, bagian permukaan terdalam didominasi oleh batuan pasir, sedangkan bagian atas terdiri dari pasir. Pada T4 memiliki struktur terdalam didominasi oleh batuan pasir, sedangkan bagian atas terdiri dari kerikil pasiran,



Gambar 5. Penampang litologi hasil interpretasi kecepatan Vs pada pengukuran titik MASW di Daerah Penelitian

oleh warna biru pada model 2D, diperkirakan lapisannya terdiri dari pasir, kerikil, tanah liat kaku, atau tanah liat lunak (Saragih, Refrizon, and Hadi 2023). Tanah keras dan batuan sedang dengan nilai Vs 300-700 m/s pada kedalaman 10-20 m, nilai Vs cukup besar yang ditandai dengan warna biru-kuning pada model 2D. Jenis tanah ini terdiri dari mineral-mineral yang tidak kompak dan dikenal sebagai sedimen yang tidak terkonsolidasi (Massinai dan Ramadhan, 2022). Batuan sedang pada kedalaman 20 hingga 30 m memiliki nilai Vs dengan kisaran 700-1500 m/s. Sementara itu, nilai Vs yang lebih tinggi ditunjukkan dengan warna kuning hingga merah

pada model 2D, yang mengindikasikan lapisan dengan kekompakan atau kekerasan yang lebih tinggi. Hal ini diduga disebabkan oleh adanya lapisan tanah dengan jenis batuan yang lebih keras pada lapisan bawah di kedalaman tersebut. Berdasarkan data yang diperoleh, hasil ini mengindikasikan bahwa semakin dalam lapisan bawah permukaan, maka semakin tinggi nilai Vs, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil dari data Vs yang didapatkan dari struktur bawah permukaan yang ditampilkan pada Tabel 2. Berdasarkan data tersebut daerah penelitian tersusun atas kerikil pasiran, pasir, lempung, dan batuan pasir.



Gambar 6. Hasil model 2D pada lintasan (a) A-A' dan (b) B-B'.

Hasil penelitian ini yang mengestimasi nilai Vs per formasi batuan di daerah Teluk Sepang, Bengkulu, dapat berguna untuk mitigasi bencana untuk pembangunan berkelanjutan. Berdasarkan data yang diperoleh melalui metode MASW, tidak terdapat indikasi keberadaan batuan keras sepanjang wilayah Teluk Sepang, Kota Bengkulu, hingga pada kedalaman 30 m di bawah permukaan. Keempat struktur batuan yang teridentifikasi memiliki struktur batuan lunak hingga batuan sedang, yang cenderung rentan terhadap deformasi. Kondisi ini perlu menjadi bahan pertimbangan dalam upaya mitigasi gempa. Hal ini berkaitan dengan kerentanan struktur tanah lunak terhadap amplifikasi getaran (Abdullah, Efendi dan Indra 2019). Oleh karena itu, perencanaan pembangunan di daerah Teluk Sepang perlu mempertimbangkan desain

pondasi yang sesuai serta mengikuti standar konstruksi tahan gempa untuk mengurangi potensi risiko.

Hasil analisis nilai kecepatan gelombang geser terhadap lintasan bawah permukaan di daerah penelitian menunjukkan bahwa wilayah tersebut tersusun atas endapan undak alluvium. Dengan demikian, daerah penelitian dapat dikategorikan sebagai area yang rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh gempa bumi (Darmawan 2023). Daerah penelitian didominasi oleh tanah lunak hingga sedang, yang cenderung memberikan respons getaran yang cukup besar saat terjadi gempa bumi, sehingga menjadikannya lebih rentan terhadap kerusakan (Sandra, Efendi dan Nurrahmi, 2015). Berdasarkan hasil penelitian ini diperlukan konstruksi bangunan tahan gempa yang dirancang untuk menghindari

Tabel 2. Tabel Litologi Titik Penelitian (BSN, 2019)

| Titik | Kedalaman (m) | Vs(m/s) | Litologi        | Klasifikasi | Titik | Kedalaman (m) | Vs(m/s) | Litologi        | Klasifikasi |
|-------|---------------|---------|-----------------|-------------|-------|---------------|---------|-----------------|-------------|
| T1    | 0-3           | 134     | Kerikil Pasiran | E           | T5    | 0-9           | 156     | Kerikil Pasiran | E           |
|       | 3-8           | 290     | Pasir           | D           |       | 9-18          | 307     | Pasir           | D           |
|       | 8-11          | 362     | Lempung         | C           |       | 18-27         | 255     | Pasir           | D           |
|       | 11-15         | 619     | Lempung         | C           |       | 27-30         | 247     | Pasir           | D           |
|       | 15-30         | 1103    | Batuan Pasir    | B           | T6    | 0-8           | 162     | Kerikil Pasiran | E           |
| T2    | 0-11          | 168     | Kerikil Pasiran | E           |       | 8-11          | 261     | Pasir           | D           |
|       | 11-21         | 313     | Pasir           | D           |       | 11-15         | 318     | Pasir           | D           |
|       | 21-30         | 243     | Pasir           | D           |       | 15-19         | 319     | Pasir           | D           |
| T3    | 0-8           | 184     | Pasir           | D           | T7    | 19-30         | 1327    | Batuan Pasir    | B           |
|       | 8-10          | 287     | Pasir           | D           |       | 0-2           | 153     | Kerikil Pasiran | E           |
|       | 10-12         | 193     | Pasir           | D           |       | 2-8           | 164     | Kerikil Pasiran | E           |
|       | 12-17         | 261     | Pasir           | D           |       | 8-10          | 269     | Pasir           | D           |
|       | 17-30         | 1090    | Batuan Pasir    | B           |       | 10-12         | 250     | Pasir           | D           |
| T4    | 0-5           | 176     | Pasir           | D           | T8    | 12-30         | 1409    | Batuan Pasir    | B           |
|       | 5-7           | 115     | Kerikil Pasiran | E           |       | 0-10          | 169     | Kerikil Pasiran | E           |
|       | 7-11          | 284     | Pasir           | D           |       | 10-14         | 322     | Pasir           | D           |
|       | 11-15         | 416     | Lempung         | C           |       | 14-18         | 349     | Pasir           | D           |
|       | 15-30         | 1582    | Batuan Pasir    | B           |       | 18-23         | 234     | Pasir           | D           |
|       |               |         |                 |             |       | 23-30         | 969     | Pasir           | D           |

dari keruntuhan dan merespons gempa dengan mempertimbangkan penggunaan material di daerah penelitian (Hariyanto and Azizah 2024).

## KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan di daerah Teluk Sepang, Kota Bengkulu menggunakan metode MASW dengan 8 titik pengukuran. Hasil litologi batuan dan pemodelan 2D menunjukkan keberadaan sedimen berada pada kedalaman sedimen 20 m. Sedangkan lapisan bawah permukaan didominasi oleh endapan Undak Alluvium. Berdasarkan variasi nilai Vs terhadap jenis batuan, pada daerah penelitian memiliki tiga klasifikasi jenis batuan diantaranya batuan tanah lunak berada pada kedalaman 1-10 m dengan nilai Vs 100-300 m/s, tanah sedang dengan nilai Vs 300-700 m/s pada kedalaman 10-20 m, tanah keras dan

batuan lunak memiliki nilai Vs 700-1500 m/s pada kedalaman 20-30 m. Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar pondasi bangunan dibangun hingga kedalaman lebih dari 20 m. Langkah ini diambil untuk memastikan pondasi yang dibangun mampu menahan beban bangunan dan mengurangi dampak getaran yang timbul saat terjadinya gempa bumi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Geofisika Universitas Bengkulu untuk pendanaan penelitian melalui skema *Project Research Independent*, MBKM Prodi Geofisika 2024. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Laboratorium Jurusan Fisika yang telah memfasilitasi alat *Seismograph 24 Channels Model 16S24P*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A., Efendi, R., Indra I., 2018. Estimasi Kecepatan Gelombang Geser Bawah Permukaan pada Lapisan Dangkal Menggunakan Data Mikrotremor di Daerah Mambo, Gravitasi, 17(2), 10–19, doi: 10.22487/gravitasi.v17i2.12418.
- Arifudin, M., A., 2018. Karakteristik Situs dan Kerentanan Seismik di Kabupaten Klaten dengan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) dari Data Mikrotremor, Tesis, Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Azizah, N. D and Hariyanto., 2024. Perancangan Struktur Tahan Gempa (Seismik) Gedung Esdm, Jurnal Ilmiah Teknosains, 10(1), 32–37.
- Bernard, A., Sugianto. N, Refrizon. R. 2019, Penentuan Stratigrafi Kecepatan Gelombang Geser (Vs) di Daerah Rawan Abrasi Kabupaten Bengkulu Utara Menggunakan Metode Multichannel Analysis of Surface Wave (Masw), Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, 6(2), 15–20, doi: 10.36754/jmkg.v6i2.119.
- Darmawan, J. C., 2023. Identifikasi Karakteristik Tanah Di Wilayah Jawa Bagian Tengah Menggunakan Metode Inversi HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), Skripsi, Program Studi fisika, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Dewi, K. I, Maison. M, Risa. N. I., 2023. Analisis Kerentanan Tanah Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor di Desa Jati Mulyo, Tanjung Jabung Timur, Jurnal Geofisika Eksplorasi, 9(1), 18–31, doi: 10.23960/jge.v9i1.236.
- Firdaus, R., Rasimeng. R, Restianingsih. W., 2020. Pengolahan Data Multichannel Analysis of Surface Wave( MASW) Menggunakan Perangkat Lunak MASWaves studi kasus : Institut Teknologi Sumatera,” Institut Teknologi Sumatera, Universitas Lampung, 1-9.
- Handoyo, 2023. Metode Multichannel Analysis of Surface Waves ( MASW ): Teori dan Aplikasi pada Identifikasi Sesar Dangkal di Dekat Permukaan ( Near Subsurface ), Jurnal Geofisika, 21(2).
- Handoyo, H., DeFelipe, I., Martín-Banda, R., García-Mayordomo, J., Martí, D., Martínez-Díaz, J.J., Insua-Arévalo, J.M., Teixidó, T., Alcalde, J., Palomeras, I., Carbonell, R., 2022. Characterization of the shallow subsurface structure across the Carrascoy Fault System (SE Iberian Peninsula) using P-wave tomography and Multichannel Analysis of Surface Waves. *Geologica Acta*, 20.9, 1-19.
- Irwandi, I. Khaizal. Z, Hasya. A. C., 2021. Perbandingan Metode Multichannel Analysis of Surface Wave dan Metode Cone Penetration Test Terhadap Analisis Lapisan Tanah, Journal of the Civil Enggining Student, 3(1), 14, doi: 10.24815/journalces.v3i1.12265.
- Juwita, W., 2022. Aplikasi Metode Gravity (Gaya Berat) untuk Identifikasi Potensi Hidrokarbon. Skripsi, Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi.
- Kamawan, Marijono and Soehaimi. A., 2010. Mikrozonasi Kerentanan Bahaya Guncangan Gempa Bumi Kota Pekalongan Berdasarkan Analisis Mikrotremor, Jurnal Sumber Daya Geologi, 20(5), 277–290.
- Khoirillia, J., 2023. Perbandingan Percepatan Spektral Desain di Provinsi Bengkulu dalam SNI 1726-2019 dan 1726-2012, Skripsi, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area, Medan.
- Laksono, A and Rasimeng. S., 2017. Interpretasi Nilai Kecepatan Gelombang Geser (Vs 30) Menggunakan Metode Seismik Multichannel Analysis Of Surface Wave (MASW) Untuk Memetakan Daerah Rawan Gempa Bumi di Kota Bandar Lampung, Jurnal Geofisika Eksplorasi, 3(3), 3–14, [Online]. Available: [http://repository.lppm.unila.ac.id/34623/1/2017 JGE Vol3 No3 Interpretasi Gelombang Geser.pdf](http://repository.lppm.unila.ac.id/34623/1/2017%20JGE%20Vol3%20No3%20Interpretasi%20Gelombang%20Geser.pdf)
- Lubis, A. M., Satriani, B., Lizalidiawati, L., & Samdara, R. 2020. Struktur Bawah Permukaan pada Lokasi Rencana Pembangunan Rumah Sakit Muhammadiyah Kota Beng-

- kulu dengan Metode seismik MASW Secara 2 Dimensi. POSITRON, 10(1), 1-7.
- Lubis, A. M., Saputra, A., Suhendra, S., Saputra, R., & Samdara, R. 2021. Penentuan Ketebalan Sedimen pada Segmen Kumering, Sesar Sumatra di Daerah Liwa Lampung Barat dengan Menggunakan Metode Seismik Aktif MASW. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 12(3), 137-147.
- Lubis, A. M., Samdara, R., Angraini, L., Ahmed, Z., & Reeve, D. E. 2022. Imaging subsurface structures at fast eroding Coastal Areas in Northern Bengkulu using 2D Seismic MASW Method. *Earth Systems and Environment*, 6(2), 531-540.
- Massinai, A. M and Ramadhan, I. M., 2022. Analysis of Subsurface Layers using the Multichannel Analysis of Surface Waves Method in Manimbahoi, Gowa Regency, *Jurnal Geoelebes*, 6(2), 126–134, doi: 10.20956/geoelebes.v6i2.22025.
- Meilita, N., 2019. Analisis Poisson'S Ratio untuk Rekomendasi Perencanaan Fondasi Bangunan Menggunakan Metode Seismik Refraksi dan Multichannel Analysis Surface Wave ( Studi Kasus : Kecamatan Manyar , Kabupaten Gresik ), Skripsi. Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Murtianto Hendro, Malik Yakub, Fachri Taqiyyah Hana., 2022. Pemetaan Tingkat Bahaya Bencana Tsunami Menggunakan Sistem Informasi Geografis di Pesisir Kota Bengkulu, *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 10(2), 166–178 , doi: 10.23887/jjgpg.v10i2.43541.
- Puspitafuri, C., Manan. A, Hamimi. L, Pratama. P. M., 2021. Estimasi Ketebalan Lapisan Sedimen Kawasan Perbukitan Kecamatan Wangi-Wangi Kabupaten Wakatobi Menggunakan Metode Hvsr, *Jurnal Rekayasa Geofisika Indonesia*, 3(02), 18, doi: 10.56099/jrgi. v3i02.23040.
- Sandra, Efendi. R, and Nurrahmi., 2015. Analisis Kecepatan Gelombang Geser Vs30 Menggunakan Metode Refraksi Mikrotremor (ReMi) di Kelurahan Talise, Gravitasi, 14(1), 7–12.
- Saragih, S, R., Refrizon, R., Hadi, I., A., 2023. Identification of Subsurface Structures in South Bengkulu Manna City Based on the Masw Method, *Indonesian Physical Review*, 6(3), 306–323. <https://doi.org/10.29303/ipr.v6i3.244>.
- Usman, A., 2014. Studi Daya Dukung Pondasi Dangkal pada Tanah Gambut Menggunakan Kombinasi Perkuatan Anyaman Bambu dan Grid Bambu dengan Variasi Lebar dan Jumlah Lapisan Perkuatan, *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(3), 297-302.
- Wardaningsih. K and Rahman. S. A., 2024. Analisis Potensi Pergerakan Tanah Berdasarkan Ground Shear Strain ( GSS ) untuk Wilayah Bekasi, *Buletin GAW Bariri*, 5, 7–14.
- Zakaria, L. M., 2018. Aplikasi Metode Seismik Refraksi dan Masw untuk Lintasan Terowongan. Skripsi, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh November.