

Analisis Potensi Likuefaksi Berdasarkan Kecepatan Gelombang Seismik Kota Bengkulu

Arif Setiawan, Della Zakia Sholeha, Alfata Kausari, Arif Ismul Hadi*

Program Studi Geofisika, FMIPA, Universitas Bengkulu

Email korespondensi : ismulhadi@unib.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/15243>

Submitted: 29 Desember 2022; Accepted: 07 Maret 2023:

ABSTRAK- Kota Bengkulu merupakan daerah yang memiliki tingkat likuefaksi yang cukup tinggi baik secara geologi ataupun secara geofisis. Hal ini karena Kota Bengkulu tersusun atas batuan berupa pasir, lanau, lumpur, lempung, gamping terumbu dan kerikil pada formasi alluvium (Qa) dan undak aluvium (Qat). Tujuan penelitian ini adalah melakukan analisis potensi likuefaksi menggunakan gelombang seismik di Kota Bengkulu untuk mendapatkan profil lapisan (V_s) dan V_{s30} berdasarkan klasifikasi situs tanah dan wilayah Kota Bengkulu berpotensi likuefaksi. Penelitian ini dilakukan menggunakan *Seismograph* PASI 16S-24P berupa seperangkat alat seismik yang digunakan pada daerah investigasi dan akan diperoleh profil V_s dari 24 *geophone* yang tersebar dengan spasi 4 m dan offside 8 m di setiap lokasi investigasi. Kemudian, menghasilkan nilai *RMS Error* dan *standard deviations*. Hasil data analisis MASW merupakan gambaran profil V_s dan V_{s30} pada lapisan bawah permukaan di Kota Bengkulu yang dapat dikelaskan dalam situs tanah. Hasil situs tanah di lokasi investigasi memiliki kelas situs yang berbeda-beda yaitu B, C, D dan E. Potensi likuefaksi dapat dianalisis menggunakan profil V_s didapatkan bahwa wilayah Kota Bengkulu memiliki variasi lapisan yang didominasi pasir dan kerikil yang dapat menyebabkan likuefaksi sangat tinggi terutama daerah Surabaya dengan situs tanah V_s dan V_{s30} memiliki nilai tanah lunak dengan rentang nilai 134,0 – 171,0 m/s dimana dilihat dari klasifikasi situs tanah itu sangat rentan dengan likuefaksi. Daerah penelitian Kelurahan Lempuing dan Rawa makmur kemungkinan terjadi potensi likuefaksi sedang dan wilayah Kelurahan Teluk Sepang dan Penurunan potensi likuefaksi rendah.

KATA KUNCI: kecepatan gelombang geser; likuefaksi; MASW

ABSTRACT- Bengkulu City has a high liquefaction rate, both geologically and geophysically. This is because Bengkulu City consists of rocks in the form of sand, silt, mud, clay, coral fragments and gravel in alluvial areas (Qa) and floodplains. Terrace formation (Qat). This study aims to analyze liquefaction potential using seismic waves in Bengkulu City, resulting in a layer profile (V_s) obtained from the V_{s30} soil of Bengkulu City and a classification of areas with liquefaction potential. This study was conducted using a PASI 16S-24P seismograph, a set of seismic equipment used in the study area, which obtained V_s profiles derived from 24 geophones 4 m and 8 m away from each study location. Then, the RMS error and standard deviation values were generated. The result of MASW analysis data describes the V_s and V_{s30} profiles in the Bengkulu City subsoil that can be classified into soil zones. Soil results at the study site show different site classes, namely B, C, D and E. Liquefaction potential can be analyzed with V_s profiles. It shows the existence of different layers in the Bengkulu city area. It can be seen that Bengkulu City is dominated by sand and gravel, causing very high liquefaction, especially in the Surabaya area, where the V_s and V_{s30} soil values have soft soil values with sensitivity values of 134.0 to 171.0 m/s. Soil classification is highly sensitive to liquefaction. The study areas of Lempuing and Rawa Makmur sub-districts generally show medium liquefaction potential, and the Teluk Sepang sub-district area shows low liquefaction potential.

KEYWORDS : shear wave velocity ; liquefaction; MASW

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan wilayah di Indonesia yang selalu mengalami bencana alam gempa bumi. Namun, telah tercatat

gempa bumi pada tahun 2005-2009 terjadi 220133 kali dengan frekuensi gempa 5.0-6.0 M_w (BMKG, 2010 dan USGS, 2012). Kemudian, Selama 22 tahun terakhir tercatat adanya

aktivitas subduksi telah menyebabkan setidaknya dua gempa bumi dengan magnitudo lebih besar dari $M_w 7.0$, dan secara signifikan berdampak pada Kota Bengkulu.

Peristiwa Gempa yang pernah terjadi di Kota Bengkulu dan sekitarnya pada 12 September 2007 menjadi salah satu gempa terbesar di Kota Bengkulu. Gempa tersebut tidak hanya menimbulkan kerusakan bangunan yang dikenal likuefaksi yang cukup masif. Namun, banyak kejadian yang telah terjadi dari gempa dahsyat tersebut (Mase, 2018). Maka penelitian dalam bidang gempa bumi semakin intensif dilakukan.

Menurut (Muntohar, 2012) Likuefaksi dapat terjadi apabila pasir berukuran halus yang bersifat jenuh air (muka air tanah dangkal) dan bersifat lepas, disebabkan oleh adanya gaya geser dari gempa bumi yang melebihi yang dimiliki oleh litologi lokal dalam ketahanan getaran. Kejadian ini disebabkan oleh beberapa peristiwa, seperti bangunan yang miring karena penurunan (*differential settlement*), pondasi bangunan yang bergeser akibat perpindahan lateral (*lateral displacement*). Likuefaksi adalah bencana yang bisa merusak bangunan sehingga perlu informasi potensi likuefaksi terhadap rencana tata ruang wilayah, salah satunya di wilayah Kota Bengkulu dan sekitarnya (Mangunpraja and Prihatiningsih, 2019).

Beberapa penelitian tentang kemungkinan likuefaksi (seismik) telah dilakukan di Kota Bengkulu dilakukan sebelumnya. Mase *et al.*, (2018) melakukan studi respon seismik lapisan permukaan dengan menggunakan model linier dan non-linier di Universitas Bengkulu. menghasilkan likuefaksi dapat terjadi pada kedalaman 6 hingga 11 meter karena akibat tekanan air pori yang berlebihan sehingga daya dukung pori air berlebihan terbentuk. Agustina *et al.*, (2019) membahas respon seismik di daerah pusat Kota Bengkulu dalam pemodelan linier dan memberikan nilai kecepatan spektral maksimum adalah sebesar 0,954 g dan terjadi selama periode pendek, kemungkinan likuefaksi dapat terjadi di sekitar Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Bengkulu ketika nilai F_s sebesar 0,225g sampai 0,779g dan nilai *Maximum Kinetic Energy Density* (MKED) sebesar 2,7g hingga $3,7 \cdot 10^2 \text{ Joule/m}^3$ pada kedalaman 0,5 m sampai 14 m. Penelitian lain, dilakukan membahas tentang likuefaksi adalah hasil Mase and Hardiansyah, (2019) di daerah Universitas Bengkulu dan Mase, (2020) di daerah pesisir Kota Bengkulu, membahas tentang potensi likuefaksi sebagai respon gelombang seismik pada kedalaman $4,5 \times 10$ m tidak ada wilayah yang aman total pada wilayah pesisir pantai kota Bengkulu untuk pembangunan rumah terutama rumah 2 lantai pada kedalaman 0-9 m.

Likuefaksi dapat terjadi pada tanah yang lunak. Tanah lunak tidak mudah untuk dilalui oleh gelombang geser (V_s). Sehingga tanah lunak mempunyai indeks kerentanan cukup tinggi. Tanah seperti ini sangat rawan terjadi likuefaksi. Metode *multichannel analysis of surface wave* (MASW) efektif dapat digunakan karena metode ini dapat melihat struktur tanah perlapisan. Metode *multichannel analysis of surface wave* (MASW) merupakan metode yang dapat menghasilkan data bawah permukaan dengan cara menganalisis gelombang *Rayleigh* yang didapatkan di lapangan, data yang didapatkan berupa kurva *disperse* (*ground roll*) dari kecepatan data gelombang geser (Zubedi, 2022) Pada data gelombang geser didapatkan profil V_s rata-rata pada kedalaman 30 m. hal ini dapat dianalisis bahwa potensi likuefaksi dapat digunakan pada lapisan tanah dan lapisan batuan (Ardianto, 2018). Dimana, profil data V_s digunakan dapat klasifikasi batuan akibat dari gempa bumi sehingga bisa dimanfaatkan untuk mitigasi (Sucuoğlu and Akkar, 2014).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan tingkat likuefaksi menggunakan gelombang seismik Kota Bengkulu. Hasil penelitian ini berdasarkan data *multichannel analysis of surface wave* (MASW) yaitu; Klasifikasi situs tanah berdasarkan nilai lapisan V_s dan profil lapisan V_s . Klasifikasi situs tanah berdasarkan nilai lapisan V_s 30. Model lapisan tanah dan profil V_s terhadap kedalaman lapisan tanah setiap lokasi

penelitian di wilayah Kota Bengkulu.

Tabel 1 didapatkan dari klasifikasi situs tanah yang dimana dari kelas situs tanah ini kita akan mendapatkan profil V_{s30} dan profil ini bisa mengetahui nilai jenis tanah. Selanjutnya dari profil ini bisa mengetahui Kota Bengkulu memiliki potensi likuefaksi. Jika wilayah investigasi didominasi tanah

lunak maka likuefaksi sangat besar jika dominasi tanah keras atau batuan maka sangat rendah likuefaksi. Likuefaksi sangat berdampak khususnya pada infrastruktur bangunan Kota Bengkulu yang dapat mempengaruhi kekuatan tanah pada bangunan.

Tabel 1. Klasifikasi situs tanah berdasarkan V_{s30} (SNI 1726, 2019)

Kelas Situ Tanah	Gambaran umum	Nilai $\bar{V}_{s30}$ (m/s)
A	Batu keras (hard rock)	> 1500
B	Batuan	750 hingga 1500
C	Tanah keras, tanah padat dan batuan lunak	350 hingga 750
D	Tanah sedang $15 \leq N \leq 50$ atau $50 \text{ kPa} \leq N \leq 100 \text{ kPa}$	175 hingga 350
E	Tanah lunak	< 175

Tabel 2. Lokasi investigasi di Kota Bengkulu

Kode lokasi	Lokasi	Koordinat	
		LS°	BT°
T-1	Teluk Sepang	-3.9298°	102.2875°
T-2	Lempuing	-3.8267	102.2806
T-3	Penurunan	-3.8107	102.2709
T-3	Rawa Makmur	-3.7771	102.2710
T-5	Surabaya	-3.7895	102.3168



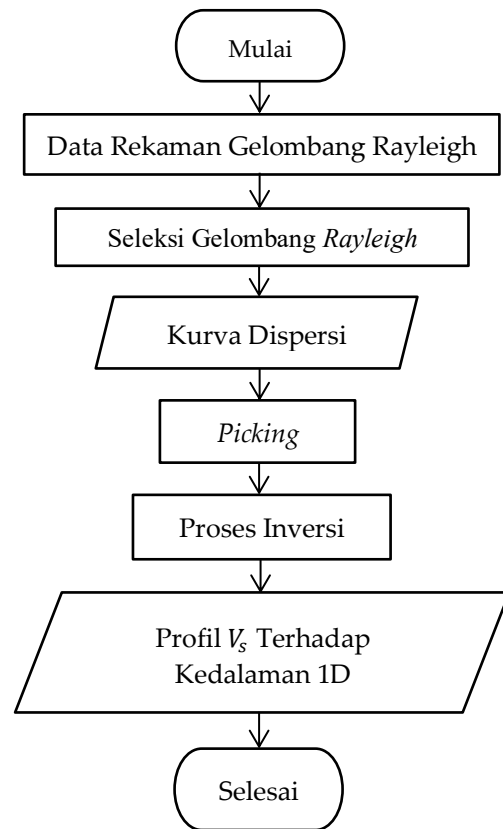
Gambar 1. Peta menunjukkan sebaran titik pengukuran MASW dan wilayah titik investigasi di Kota Bengkulu : T-1 (Teluk Sepang), T-2 (Lempuing), T-3 (Penurunan), T-4 (Rawa Makmur), dan T-5 (Surabaya) (dimodifikasi dari Google Earth, 2022)

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan metode *multichannel analysis of surface wave MASW* yang digunakan untuk analisis potensi likuefaksi berdasarkan kecepatan gelombang geser. Penelitian dilakukan di wilayah kota Bengkulu yaitu; Teluk sebang, Lempung, Penurunan, Rawa Makmur dan Surabaya yang berada di Kota Bengkulu. Gambar 1 dan Tabel 2 sesuai dengan lokasi penelitian Mase, (2020). Kemudian dilakukan pengambilan data primer yang didapatkan dari hasil data lapangan yaitu kecepatan gelombang geser (V_s).

Penelitian ini menggunakan alat *Seismograph PASI 16S-24P* merupakan set alat seismik. Jumlah titik pengukuran sebanyak 5 lokasi investigasi. Tahap akuisisi data gelombang (*receiver*) dengan menggunakan 24 sumber geophone dan secara vertikal menggunakan frekuensi 4,5 Hz dan menggunakan sumber pukulan dari godam palu berat 5 kg sebagai sumber sehingga total jarak pada lintasan adalah 92 m dengan jarak geophone 4 m dan *offside* 8 m. Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) diperoleh melakukan proses processing menggunakan *Software winMASW 5.0 Profesional* yaitu dengan mengubah data rekaman diperoleh geophone dari domain waktu jadi domain frekuensi. Kemudian, berubah menjadi kecepatan fase pada frekuensi (Olafsdottir, 2014) Proses pertama dalam pengolahan adalah melakukan seleksi data yang mana hanya gelombang *Rayleigh* digunakan, *noise* yang terekam selama proses akuisisi data dihilangkan. Kemudian pembuatan kurva dispersi yaitu plot data yang menghubungkan kecepatan fase dengan frekuensi dan dilakukan *picking* pada kurva dispersi. Berikutnya dilakukan proses inversi yang akan menghasilkan kecepatan gelombang geser (V_s), kemudian proses pemilihan lapisan, menghasilkan profil V_s 1D dan *subsurface* 1D. Model 1D dapat dianalisis dengan nilai *RMS Error* (RMSE) dan *Standard deviations* yang diperoleh. Semakin kecil nilai *RMS Error* dan *Standard deviations*, maka profil gelombang geser semakin baik. Proses pengolahan data ditunjukkan pada

Gambar 2 diagram alir pengolahan data sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram alir pengolahan data

Pada penelitian ini pemodelan 1D yang dihasilkan di lokasi yang berbeda-beda. Pemodelan 1D didapatkan dari nilai gelombang geser. Kemudian, untuk menentukan nilai gelombang geser dapat menggunakan kelas situs berupa hasil inversi V_{s30} pada kedalaman 30 meter (Pegah and Liu, 2016). Data V_{s30} adalah data yang digunakan dalam bidang teknik geofisika untuk menentukan struktur bawah tanah hingga kedalaman 30 meter, Pembesaran gelombang gempa hanya ditentukan oleh lapisan batuan hingga kedalaman 30 m (Wangsadinata, 2006). Rumus perhitungan V_{s30} digunakan sebagai berikut: (Nasri, *et al* 1975)

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m \frac{t_i}{V_{s_i}}} \quad (1)$$

Dimana i adalah jumlah indeks perlapisan, m ialah total lapisan hingga kedalaman 30 meter, t adalah ketebalan lapisan (m), V_s adalah kecepatan gelombang geser (m/s).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geofisik

Secara umum, wilayah lokasi investigasi dapat dilihat bahwa karakteristik batuan terdiri dari batuan *alluvium* yang sangat rentan terhadap guncangan gempa bumi dan berpotensi terjadinya bencana seperti likuefaksi. Selain itu, nilai frekuensi daerah investigasi cukup rendah dan memiliki sedimen yang tebal. Hal ini dapat mempengaruhi besarnya intensitas dan durasi gempa bumi sehingga dapat mengakibatkan potensi sangat besar likuefaksi semakin meningkat cepat.

Kota Bengkulu didominasi oleh lapisan tanah berpasir dengan tingkat kepadatan lepas (*loose sand*) sampai tingkat kepadatan rapat (*dense sand*). Pasir yang memiliki kepadatan lepas ditemukan pada kedalaman yang dangkal, pada kedalaman dari 0-1 m, dan 8-10 m. Pasir kepadatan sedang ditemukan pada kedalaman 1-6 m. Pasir kepadatan rapat ditemukan pada kedalaman 6-8 m.

Berdasarkan interpretasi penelitian likuefaksi berpotensi terjadi pada lapisan pasir padat sampai lapisan pasir kepadatan sedang. Muka air tanah lokasi investigasi pada kedalaman 0,5 m sampai 4 m. Meskipun demikian, dalam analisis muka air tanah ini dapat diasumsikan berada di permukaan tanah.

Adapun hal yang harus diketahui tentang perlapisan tanah pada nilai kecepatan gelombang geser (V_s). *National earthquake hazards reduction program* NEHRP menyarankan V_{s30} dapat digunakan untuk memperkirakan kondisi situs tanah. *National earthquake hazards reduction program* NEHRP menyimpulkan kompilasi dari V_{s30} yang dapat dijadikan acuan dalam penentuan kondisi tapak setempat ditunjukkan Tabel 1. Pada Tabel 1 terdapat enam kelas situs yang dibedakan berdasarkan jangkauan V_{s30} . Umumnya kelas tapak A dan B dikategorikan sebagai tapak batuan, sedangkan Kelas Tapak C, D, E, dan F dikategorikan sebagai tapak tanah. Penggunaan V_{s30} juga digunakan untuk beberapa keperluan dalam bidang rekayasa

gempa, seperti analisis respon seismik tanah, estimasi percepatan puncak tanah dengan menggunakan model atenuasi (Likitlersuang *et al*, 2019) menyebutkan bahwa perkiraan kondisi tapak tanah yang akan mempengaruhi prediksi gerakan tanah. Oleh karena itu, pengukuran kecepatan gelombang geser harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan hasil yang bagus.

Setiap profil nilai V_s 30 memiliki lapisan berbeda beda berdasarkan hal ini nilai gelombang V_s yang bisa kita lihat dari Klasifikasi situs tanah dari (SNI 1726 : 2019) dari situs tanah ini dapat melihat kelas situs pada setiap lapisan pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 7.

Analisis nilai V_s setiap lapisan

Lapisan di setiap titik lokasi memiliki situs tanah yang bervariasi. Hasil analisis pada pada setiap lapisan dilihat pada Tabel 3 sampai Tabel 8 nilai V_s sesuai dengan Table 1 penentuan klasifikasi situs tanah menurut (SNI 1726, 2019).

Tabel 3 memiliki nilai situs tanah yang sangat bervariasi dengan nilai pada lapisan pertama 162,0 m/s situs tanah lunak (E), lapisan kedua 268,0 m/s situs tanah sedang (D), lapisan ketiga dan lapisan keempat memiliki nilai 376,0–401,0 m/s situs tanah keras dengan batuan lunak (C) dan lapisan kelima 861,0 m/s situs tanah batuan (B) Pada Tabel 3 daerah Kelurahan Teluk Sepang dapat dianalisis bahwa berpotensi likuefaksi. Karena pada lapisan pertama dan kedua dengan situs tanah lunak (E) dan tanah sedang (D) memiliki tanah pasir disebabkan tidak jauh dari bibir pantai dan jenuh air. Pada lapisan tiga, empat dan lima yang memiliki tanah batuan keras sedang. Berpotensi likuefaksi sangat kecil karena memiliki kandungan tanah batuan cukup banyak.

Tabel 4 memiliki situs tanah pada lapisan pertama sampai lapisan kedua dengan situs tanah lunak (E) memiliki nilai 167,0–171,0 m/s , lapisan ketiga dan lapisan kelima memiliki situs tanah (D) tanah sedang 222,0–275,0 m/s dan lapisan enam dengan situs tanah keras dan batuan lunak (C) nilai 486,0 m/s .

Tabel 3. Klasifikasi situs tanah A, B, C, D dan E pada per lapisan berdasarkan nilai V_s daerah Kelurahan Teluk Sepang (T-1).

Kode lokasi	Lapisan	V_s (m/s)	Kelas situs (site classes) (A, B, C, D, E)	
T 1	Lapisan 1	162,0	E	Tanah lunak
T 2	Lapisan 2	268,0	D	Tanah sedang
T 3	Lapisan 3	401,0	C	Tanah keras, tanah sangat padat dan batuan lunak
T 4	Lapisan 4	376,0	C	Tanah keras, tanah sangat padat dan batuan lunak
T 5	Lapisan 5	861,0	B	Batuan

Tabel 4. Klasifikasi situs tanah A, B, C, D dan E pada per lapisan berdasarkan nilai V_s daerah Kelurahan Lempuing (T-2).

Kode lokasi	Lapisan	V_s (m/s)	Kelas situs (site classes) (A, B, C, D, E)	
T 1	Lapisan 1	171,0	E	Tanah lunak
T 2	Lapisan 2	167,0	E	Tanah lunak
T 3	Lapisan 3	222,0	D	Tanah sedang
T 4	Lapisan 4	256,0	D	Tanah sedang
T 5	Lapisan 5	275,0	D	Tanah sedang

Tabel 5. Klasifikasi situs tanah A, B, C, D dan E pada per lapisan berdasarkan nilai V_s daerah Kelurahan Penurunan (T-3).

Kode lokasi	Lapisan	V_s (m/s)	Kelas situs (site classes) (A, B, C, D, E)	
T 1	Lapisan 1	182,0	D	Tanah sedang
T 2	Lapisan 2	221,0	D	Tanah sedang
T 3	Lapisan 3	204,0	D	Tanah sedang
T 4	Lapisan 4	361,0	C	Tanah keras, tanah padat dan batuan lunak
T 5	Lapisan 5	478,0	C	Tanah keras, tanah padat dan batuan lunak

Tabel 6. Klasifikasi situs tanah A, B, C, D dan E pada per lapisan berdasarkan nilai V_s daerah Kelurahan Rawa Makmur (T-4).

Kode lokasi	Lapisan	V_s (m/s)	Kelas situs (site classes) (A, B, C, D, E)	
T 1	Lapisan 1	158,0	E	Tanah lunak
T 2	Lapisan 2	173,0	E	Tanah lunak
T 3	Lapisan 3	149,0	E	Tanah lunak
T 4	Lapisan 4	204,0	D	Tanah sedang
T 5	Lapisan 5	224,0	D	Tanah sedang

Tabel 7. Klasifikasi situs tanah A, B, C, D, dan E pada per lapisan berdasarkan nilai V_s daerah Kelurahan Surabaya (T-5).

Kode lokasi	Lapisan	V_s (m/s)	Kelas situs (site classes) (A, B, C, D, E)	
T 1	Lapisan 1	152,0	E	Tanah lunak
T 2	Lapisan 2	134,0	E	Tanah lunak
T 3	Lapisan 3	171,0	E	Tanah lunak
T 4	Lapisan 4	170,0	E	Tanah lunak
T 5	Lapisan 5	198,0	D	Tanah sedang

Pada Tabel 4 di daerah Kelurahan Lempuing dapat dianalisis lapisan pertama sampai empat memiliki tanah lunak (E) dan tanah sedang (D) yang diduga berpotensi likuefaksi sedang. Karena pada lapisan kelima memiliki tanah keras, padat dan batuan lunak yang memiliki batuan kerikil dan pasir. Oleh sebab itu dapat dianalisis berpotensi likuefaksi sedang.

Klasifikasi situs tanah pada Tabel 5 pada lapisan pertama sampai lapisan ketiga memiliki situs tanah sedang (D) nilai 182,0 - 221,0 m/s , lapisan keempat sampai lapisan kelima situs tanah keras dengan batuan lunak (C) nilai 361,0-478,0 m/s dan lapisan keenam memiliki situs batuan (B) nilai 911,0 m/s . Tabel 5 dapat di analisis daerah Kelurahan Penurunan berpotensi kecil likuefaksi. Karena memiliki kelas situs lapisan pertama dan tiga tanah sedang. Lapisan empat dan lima lapisan tanah keras, padat dan batuan lunak. Lapisan enam memiliki batuan. Karena hal ini dapat di analisis bahwa lapisan memiliki tanah lempung, batuan dan sedikit pasir. Hal ini menyebabkan sulitnya fluida melewati lempung di lapisan pertama dan kekuatan batuan yang cukup tinggi.

Tabel 6 memiliki klasifikasi situs tanah. Pada lapisan pertama sampai lapisan ketiga memiliki lapisan tanah lunak (E) dengan nilai 158,0 - 173,0 m/s . Lapisan keempat sampai lapisan kelima situs tanah sedang (D) nilai 204,0-224,0 m/s . Lapisan keenam memiliki tanah keras dan batuan lunak (C) dengan nilai 497,0 m/s . Pada tabel 6 daerah rawa makmur dapat di analisis berpotensi likuefaksi sedang. Karena memiliki kelas situs tanah yang hampir sama dengan tabel 4 dengan dominasi tanah lunak (E), tanah sedang (D) dan memiliki tanah keras, tanah padat dan batuan lunak (C). Dengan dominasi jenis batuan pasir dan memiliki batuan kerikil dan pasir.

Tabel 7 situs tanah pada lapisan pertama sampai lapisan keempat memiliki nilai 134,0 - 171,0 m/s dengan tanah lunak (E), Lapisan kelima lapisan tanah sedang (D) memiliki nilai 198,0 m/s dan lapisan keenam memiliki situs tanah keras dengan batuan lunak (C) dengan nilai 537,0 m/s . Tabel 7 daerah Surabaya

memiliki potensi likuefaksi cukup tinggi. karena itu dapat di analisis memiliki kelas situs tanah didominasi tanah lunak (E) dari lapisan pertama dan empat. Pada daerah Surabaya memiliki muka air tanah cukup dangkal karena berdekatan dengan Danau Dendam dan secara geologi memiliki endapan rawa.

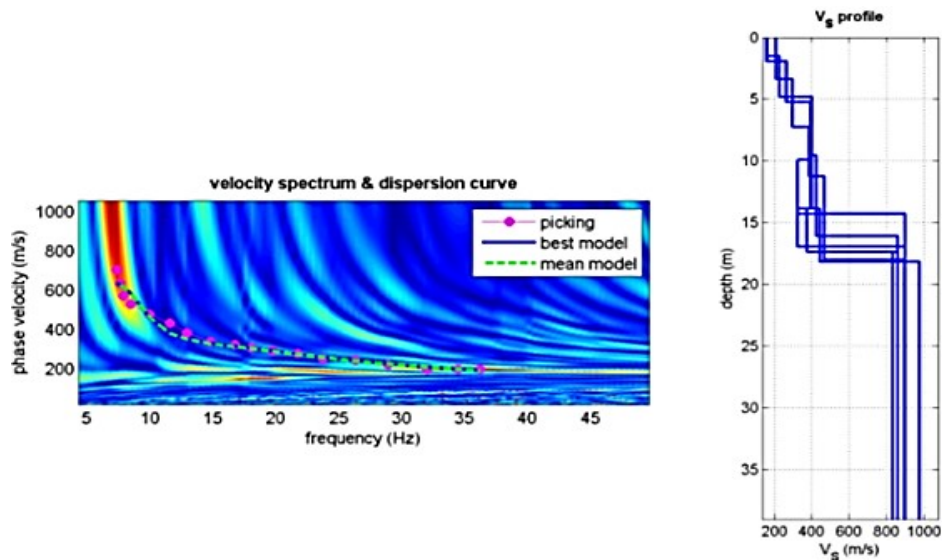
Model 1D dan Kurva disperse

Model 1D dan kurva dispersi diolah dari proses inversi dengan menggunakan *Software winMASW 5.0* terdapat dari Gambar 3 sampai Gambar 7.

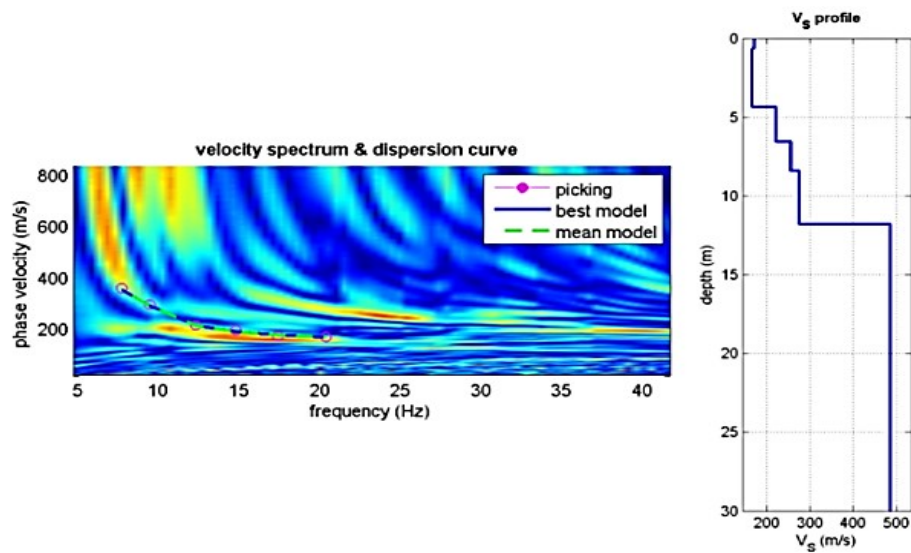
Gambar 3 dapat dilihat kurva dispersi pada lokasi T-1 di Kelurahan Teluk Sepang dengan nilai frekuensi 7- 36 Hz dan data observasi 193,69–637,46 (m/s) dan data prediksi pada kecepatan fase 193,30–636,48 (m/s). Observasi dan prediksi mendapatkan nilai *RMS Error* sebesar 10,65%, dengan melakukan iterasi 20 kali. Gambar 3 menunjukkan nilai V_s hasil inversi pada kedalaman mulai dari 162,0–861,0 (m/s) di kedalam 30 m bawah permukaan tanah.

Kemudian, pada Gambar 4 didapatkan pada lokasi T-2 wilayah di Kelurahan Lempuing mendapatkan frekuensi fase 7-20 Hz dan memiliki fase kecepatan (observasi) antara 168,91–352,67 (m/s) dan hasil data prediksi dengan kecepatan fase yaitu 168,88–352,58 (m/s). nilai *RMS Error* sebesar 2,58% perbedaan dari observasi dan prediksi memiliki perbedaan kurva dispersi, dengan melakukan iterasi 6 kali pengulangan. Hasil Gambar 4 menunjukkan terjadi peningkatan nilai V_s dari hasil *deep inversion* yaitu mulai dari 171,0 (m/s) hingga 486,0 (m/s) di kedalam 30 m.

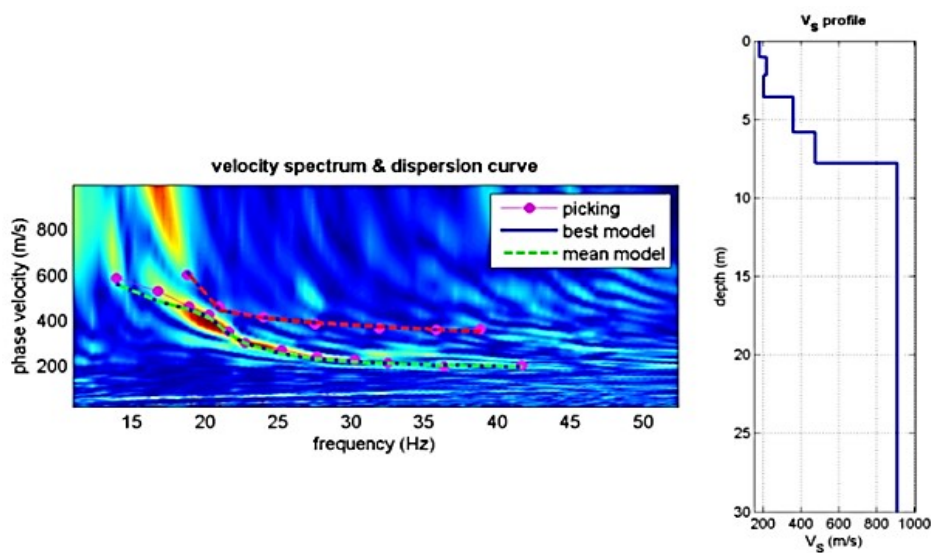
Selanjutnya, pada Gambar 5 lokasi T-3 di Kelurahan Penurunan diperoleh kurva dispersi dengan nilai frekuensi 13-41 Hz dengan kecepatan fase 199,05-560,26 (m/s) dan data prediksi kecepatan fase 199,05-560,28 (m/s). Hasil observasi kecepatan fase dan prediksi memiliki perbedaan kurva dispersi nilai *RMSE* sebesar 7,37%, kemudian dilakukan iterasi 15 kali. Hasil Gambar 5 terlihat terjadi kenaikan V_s terhadap kedalaman, mulai 182,0–911,0(m/s).



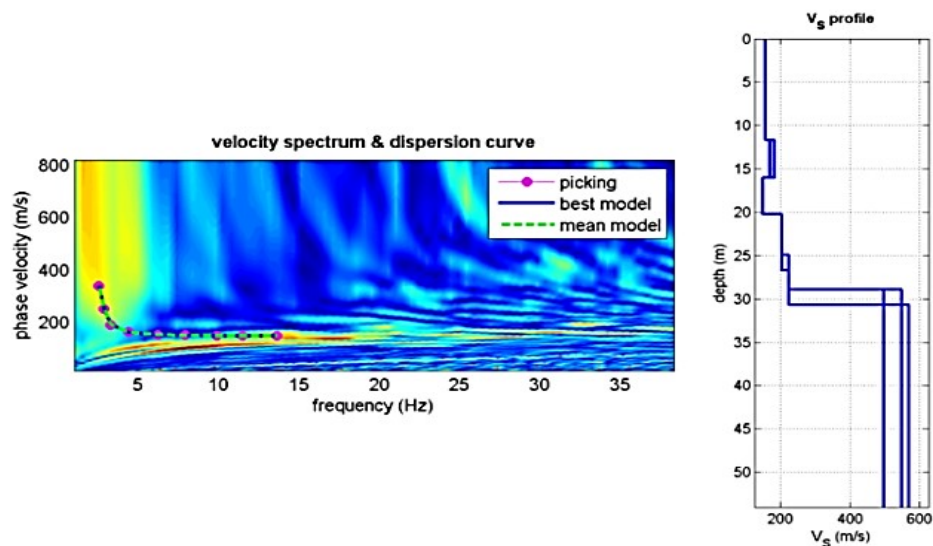
Gambar 3. Profil V_s (1D) dan Kurva dispersi untuk lokasi Kelurahan Teluk Sepang



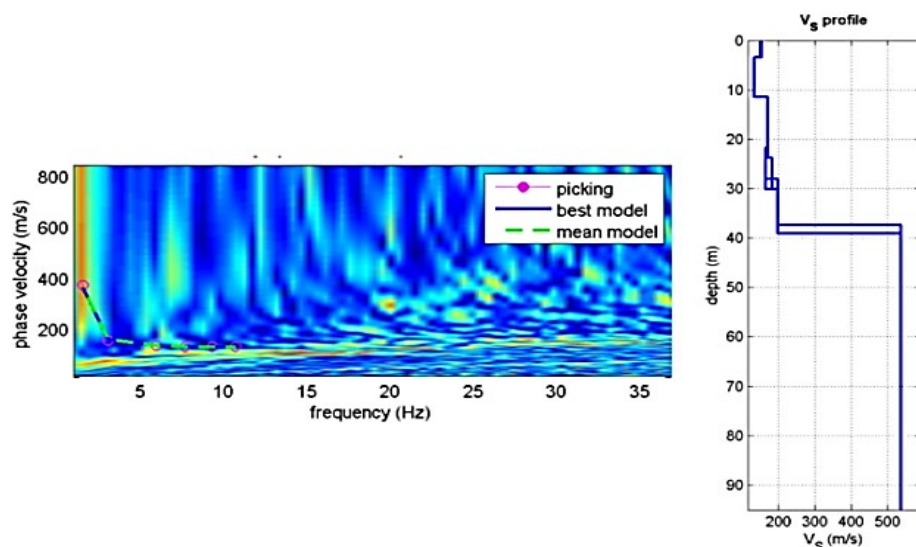
Gambar 4. Profil V_s (1D) dan kurva dispersi lokasi Kelurahan Lempuing



Gambar 5. Profil V_s (1D) dan kurva dispersi lokasi Kelurahan Penurunan



Gambar 6. Profil V_s (1D) dan Kurva dispersi lokasi Kelurahan Rawa Makmur



Gambar 7. Profil V_s (1D) dan kurva dispersi lokasi Kelurahan Surabaya

dari kedalaman 30 m. Terlihat pada T-3 terlihat tinggi dari lokasi T-2 dimana lokasi tidak terlalu jauh.

Kurva dispersi pada Gambar 6 lokasi Kelurahan Rawa Makmur pada T-4 memiliki nilai frekuensi 2×13 Hz dan memiliki data observasi kecepatan fase $149,18\text{--}340,79$ (m/s) dan kecepatan fase pada data prediksi berkisar $149,22\text{--}341,94$ (m/s). Data observasi dan prediksi pada kurva dispersi memiliki hasil yang berbeda pada nilai *RMS Error* sebesar 0.59% dan dilakukan iterasi 9 kali. Pada Gambar 6 menunjukkan nilai V_s hasil inversi kedalaman $158,0\text{--}525,0$ (m/s) di kedalaman 30 m.

Terakhir kurva dispersi di Kelurahan Penurunan pada Gambar 7 pada lokasi T-5 nilai frekuensi 1-10 Hz dan kecepatan fase $133,26$

(m/s)– $362,35$ (m/s) dan pada data prediksi kecepatan fase $132,94\text{--}363,36$ (m/s). Dimana, prediksi dan observasi dari kurva dispersi menghasilkan *RMS Error* sebesar 0,84% dengan 6 kali iterasi. Data hasil menunjukkan nilai V_s kedalaman mulai dari $152,0\text{--}537,0$ (m/s) di 30 m kedalaman

Analisis Nilai V_{s30}

Hasil analisis pada tabel 8 mendapatkan nilai V_{s30} untuk menentukan klasifikasi situs tanah menurut SNI 1726 2019 (SNI 1726, 2019). Berdasarkan nilai V_{s30} , T-5 (Surabaya) dengan nilai $156,0$ m/s pada kedalaman 30 m lapisan tanah termasuk dalam klasifikasi situs tanah E termasuk jenis tanah lunak. Di lokasi T-2 (Lempuing) dengan nilai $323,0$ m/s dan T-4 (Rawa Makmur) dengan nilai $176,0$ m/s didominasi lapisan Situs tanah D yang

menunjukkan jenis tanah sedang. Sedangkan, pada lokasi T-1 (Teluk Sepang) dengan nilai 431,0 *m/s* dan T-3 (Penurunan) memiliki nilai 571,0 *m/s* memiliki klasifikasi situs C dengan lapisan tanah keras dan batuan lunak.

Oleh karena itu, klasifikasi situs tanah di wilayah Kota Bengkulu terdapat variasi pada setiap lapisan dan dapat mempengaruhi nilai percepatan pada permukaan tanah yang potensi likuefaksi pada setiap lokasi investigasi.

Analisis potensi likuefaksi

Berdasarkan Tabel 9 memiliki hubungan antara potensi likuefaksi dan muka air tanah. menurut (Youd *et al.*, 1979) pada kedalaman muka air tanah di wilayah Kelurahan Lempuing dan Surabaya memiliki potensi likuefaksi sangat tinggi, wilayah Teluk Sepang dan Penurunan berpotensi likuefaksi tinggi

dan untuk wilayah Rawa Makmur potensi likuefaksi yang rendah. Dengan ini, potensi likuefaksi di Kota Bengkulu dipengaruhi pada kedalaman air tanah. Adapun selain tinggi muka air tanah, ada faktor lain yang dapat menentukan potensi likuefaksi, yaitu tingkat kepadatan dan jenis tanah. Ketika lapisan tanah lempung dominan likuefaksi kecil terjadi.

Gambar 8 sampai Gambar 12 merupakan hasil profil lapisan tanah dan grafik lapisan tanah yang dianalisis di lokasi investigasi didasarkan data V_s berpotensi likuefaksi. Hasil analisis dari profil lapisan V_s memperlihatkan lokasi berpotensi likuefaksi berada pada lapisan pasir dan memiliki nilai V_s bervariasi. Hal ini, mempengaruhi muka air tanah dengan lapisan pasir lebih dominan dari percepatan tanah yang didapat gempa bumi.

Tabel 8. Klasifikasi situs tanah A,B, C, D, dan E lokasi Investigasi berdasarkan nilai $V_{s,30}$.

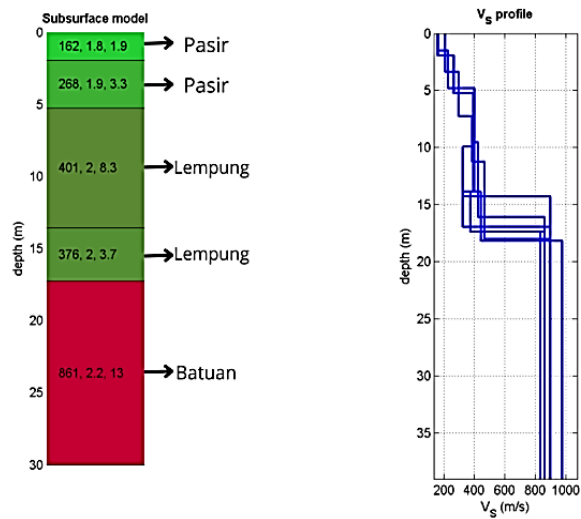
Kode Titik	Tempat	$V_{s,30}$ (m/s)	Klas Situs (site classes) A, B, C, D, E	
T 1	Teluk Sepang	431,0	C	Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
T 2	Lempuing	323,0	D	Tanah Sedang
T 3	Penurunan	571,0	C	Tanah keras, sangat padat dan batuan lunak
T 4	Rawa Makmur	176,0	D	Tanah sedang
T 5	Surabaya	156,0	E	Tanah lunak

Tabel 9. Hubungan potensi likuefaksi dan permukaan (Youd *et al.*, 1979)

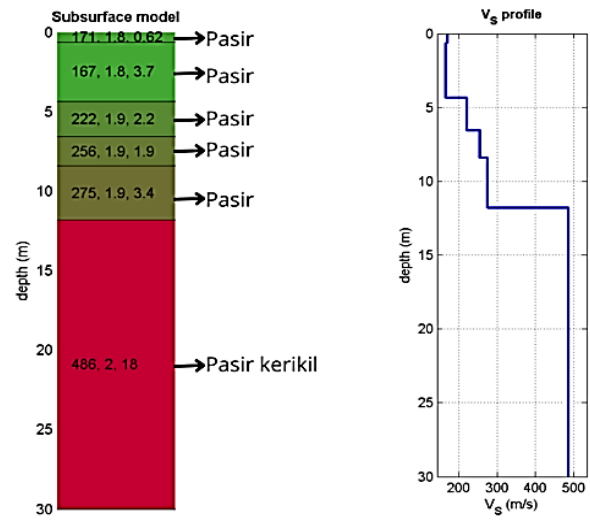
Kode Titik	Tempat	Muka air tanah (m)	Klasifikasi Likuefaksi
T 1	Teluk Sepang	7,0	Tinggi
T 2	Lempuing	2,0	Sangat tinggi
T 3	Penurunan	6,0	Tinggi
T 4	Rawa Makmur	14,0	Rendah
T 5	Surabaya	2,0	Sangat tinggi

Tabel 10. Pengaruh potensi likuefaksi pada lapisan di lokasi investigasi.

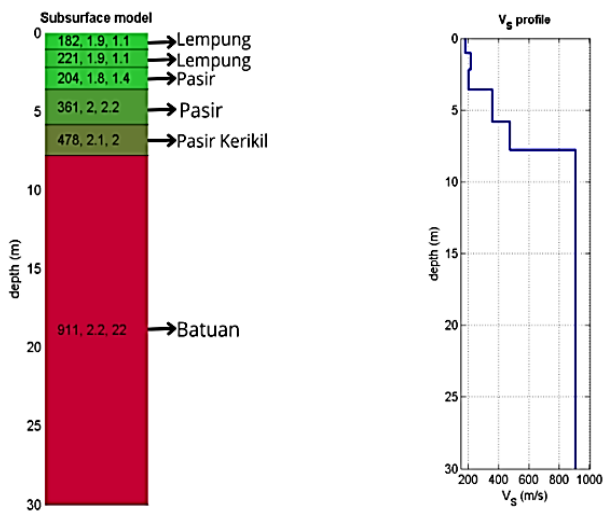
Kode Titik	Lokasi	Likuefaksi di lapisan pasir (m) (Febriana <i>et al.</i> , 2020)	
		Investigasi	
T 1	Teluk Sepang	0-5	0-10
T 2	Lempuing	0-12	0-10
T 3	Penurunan	3-6	6
T 4	Rawa Makmur	16-29	16
T 5	Surabaya	11-37	16-30



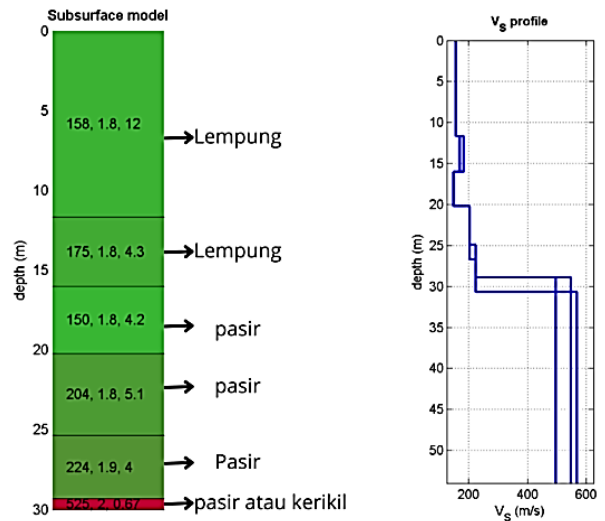
Gambar 8. Profil V_s dan model lapisan tanah terhadap kedalaman di lokasi T-1 (Teluk Sepang).



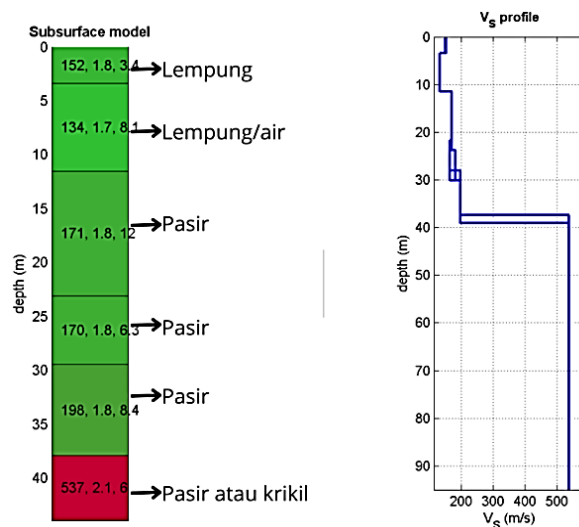
Gambar 9. Profil V_s dan model jenis lapisan tanah terhadap kedalaman di lokasi T-2 (Lempung)



Gambar 10. Profil V_s dan model lapisan tanah terhadap kedalaman di lokasi T-3 (Penurunan)



Gambar 11. Profil V_s dan model lapisan tanah terhadap kedalaman di lokasi T-4(Rawa Makmur)



Gambar 12. Profil V_s dan model lapisan tanah terhadap kedalaman di lokasi T-5 (Surabaya)

Pada lokasi T-1 (Teluk Sepang) potensi likuefaksi dapat terjadi pada kedalaman antara 0 sampai 5 m dengan lapisan pasir seperti Gambar 8 berdasarkan tabel 3 memiliki nilai V_s yang bervariasi yaitu tanah lunak bernilai 162,0 m/s dan batuan 861,0 m/s diduga potensi likuefaksi rendah.

Pada Gambar 9 pada lokasi T-2 (Lempuing) lapisan pasir antar 0 sampai 12 m akan sangat dominan akan mengalami likuefaksi dan tabel 4 memiliki klasifikasi situs tanah lunak, sedang dan tanah keras dan batuan lunak berdasarkan dari penelitian (Mase *et al.*, 2014) mengatakan kelurahan lempuing berpotensi likuefaksi.

Sementara itu, pada lokasi T-3 (Penurunan) pada Gambar 10, likuefaksi akan terjadi pada kedalaman 4 m sampai 8 m dan pada tabel 5 memiliki klasifikasi situs daerah tanah sedang, tanah batuan lunak dan bebatuan diduga likuefaksi cukup rendah karena didominasi tanah sedang (pasir padat) dengan nilai 182,0 sampai 221,0 m/s. Dan batuan pada lapisan 6 dengan nilai 911,0 m/s

Sedangkan Gambar 11 pada lokasi T-4 (Rawa Makmur) lapisan pasir pada kedalaman antara 16 sampai 29 m berpotensi likuefaksi dari hasil tabel 6 terlihat klasifikasi situs tanah tanah lunak, tanah sedang dan tanah keras dengan batuan lunak. Pada lokasi Rawa Makmur berpotensi terjadi likuefaksi karena didominasi tanah lunak di tiga lapisan dengan rentan nilai 158,0 sampai 173,0 m/s.

Pada Gambar 12, lapisan pasir pada kedalaman antara 12-40 m di lokasi T-5 (surabaya) akan mengalami likuefaksi dari hasil Tabel 8 memiliki klasifikasi situs tanah yang didominasi tanah lunak dan memungkinkan potensi likuefaksi cukup tinggi. Demikian, hasil analisis wilayah kelurahan surabaya diduga memiliki likuefaksi sangat tinggi dari pada lokasi investigasi lainnya. Selain itu, data hasil analisis investigasi gempa dan percepatan tanah pada kajian ini, likuefaksi akan terjadi pada lapisan yang mengandung pasir dengan nilai V_s kurang dari 200 m/s di semua lokasi investigasi.

Tabel 6 adalah perbandingan *output* data dengan *output* penelitian (Febriana *et al.*, 2020). Likitlersuang *et al.*, (2019) Hampir memiliki kemiripan pada lapisan yang berpotensi likuefaksi dengan hasil investigasi. Metode *multichannel analysis of surface wave* (MASW) memudahkan dalam pengambilan data V_s dan profil setiap lapisan. Data hasil penelitian ini bahwa Kelurahan Surabaya memiliki likuefaksi tinggi

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi yang sudah dilakukan tentang potensi likuefaksi menggunakan gelombang seismik di Kota Bengkulu disimpulkan daerah kawasan Kota Bengkulu memiliki potensi likuefaksi yang berbeda-beda.

Kondisi perlapisan tanah di lokasi Penelitian menggunakan kecepatan gelombang geser menunjukkan bahwa secara keseluruhan daerah Kota Bengkulu didominasi pasir, lempung dan berpotensi likuefaksi.

Pada lokasi penelitian, T-5 Kelurahan Surabaya sangat berpotensi likuefaksi. Karena didominasi pasir dan Lempung dan didominasi situs tanah lunak dengan rentan nilai 158,0 sampai 173,0 m/s. Dimana, daerah berlapisan pasir, lapisan lunak dan kadar muka air tanah yang sangat tinggi rentan terkena likuefaksi.

Daerah kawasan T-1 dan T-3 sedang kecil kemungkinan terjadi likuefaksi karena daerah tersebut didominasi batuan, kerikil dan situs tanah merupakan tanah sedang ataupun tanah keras dengan batuan lunak.

Pada lokasi T-2 dan T-4 Diduga memungkinkan akan terjadi likuefaksi dengan daerah memiliki pasir dan kerikil yang sedang dan memiliki klasifikasi situs tanah sedang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai Jurusan Fisika dan Program Studi Geofisika Universitas Bengkulu dalam kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa-mahasiswa Geofisika FMIPA Universitas Bengkulu yang telah

membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, S., P.W Anggraini, M.N Fikri, and L.Z. Mase. 2019. "Analisis Respon Seismik Area Sentral Di Kota Bengkulu." *6th ACE Conference* (April 2020): 891–901.
- Ardianto. 2018. "Pemetaan Kecepatan Gelombang Geser (Vs30) Metode *Multichannel Analysis of Surface Wave* Untuk Zonasi Amplifikasi Gempa Wilayah Surabaya Bagian Timur."
- BMKG. 2010. Katalog Gempa 2005-2009. Bengkulu: Badan Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika.
- Likitlersuang, S. et al. 2019. "Influence of Spatial Variability of Ground on Seismic Response Analysis: A Case Study of Bangkok Subsoils." : 1–13.
- Mangunpraja, David Manoel, and Aniek Prihatiningsih. 2019. "Analisis Perbaikan Tanah Sebagai Bentuk Mitigasi Bencana Likuefaksi Yang Dapat Diaplikasikan Masyarakat Di Palu." *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil* 2(4): 95.
- Mase, L Z. 2018. "Studi Keandalan Metode Analisis Likuefaksi Menggunakan SPT Akibat Gempa 8 , 6 M w , 12 September 2007 Di Area Pesisir Kota Bengkulu." 25(1): 53–60.
- Mase, Lindung Zalbuin et al. 2014. "Analisis Potensi Likuefaksi Di Kelurahan Lempuing Kota Bengkulu Menggunakan Percepatan Maksimum Kritis." (2008): 45–55.
- Mase, Lindung Zalbuin, and Hardiansyah Hardiansyah. 2019. "An Implementation of Numerical Analysis in Predicting the Liquefaction Potential on Soil Sites in University of Bengkulu." *Prosiding*(Januari 2020): 191–201.
- Mase, Lindung Zalbuin, and Lindung Zalbuin Mase. 2020. "Liquefaction Potential Analysis Based on Nonlinear Ground Response on the Coastline of Bengkulu City , Indonesia." 24(1): 34–42.
- Mase, Lindung Zalbuin, Mawardi, and Khairul Amri. 2018. "A Comparison of Soil Models for Seismic Response Analysis." (September): 227–357.
- Muhammad Nasri1, Erfan Syamsuddin, Sabrianto Aswad. 1975. "Analisis Daya Dukung Tanah Melalui Penelusuran Kecepatan Gelombang Geser Tanah." *Geofisika* 24(2): 168.
- Muntohar, A.S. 2012. "Studi Parametrik Potensi Likuefaksi Dan Penurunan Permukaan Tanah Berdasarkan Uji Sondir." (*Proceedings 16th Annual Scientific Meeting, Jakarta*): 139–44.
- Olafsdottir, E.A. 2014. *Multichannel Analysis of Surface Waves Methods for Dispersion Analysis of Surface Wave Data*. University of Iceland, Reykjavik, Iceland.
- Pegah, E., and H. Liu. 2016. *Application of nearsurface seismic refraction tomography and multichannel analysis of surface waves for geotechnical site characterizations: a case study*. Eng. Geol. 208 208: 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.021>.
- R.P, Febriana, Feranie S, and Tohari A. 2020. "Analisis Potensi Likuefaksi Di Daerah Cekungan Bandung Berdasarkan Data Standard Penetration Test (SPT)." 11(April 2020): 25–39.
- SNI 1726. 2019. "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung." *Bsn* (8): 254.
- Sucuoğlu, H., Akkar, S. 2014. *seismology to analysis and design*. Springer International Publishing *Basic Earthquake Engineering: From Seismology to Analysis and Design*.
- USGS. 2012. "Search Earthquake Archives." USA: U.S. Geological Survey.
- Wangsadinata, Wiratman. 2006. "Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berdasarkan SNI 1726-2002." In *Shortcourse HAKI 2006*. Jakarta,.
- Youd, T.L. et al. 1979. *Liquefaction Potential Map of San Fernando Valley, California. Progress on Seismic Zonation in the San Francisco Bay Region*. USGS Circular, 807.
- Zubedi, Jihan Faruk. 2022. "Analisis Lapisan Bawah Permukaan Menggunakan

Metode Multichannel Analysis of
Surface Waves (MASW) Di Kampus

Universitas Hasanuddin.”