

Analisis Potensi Likuefaksi di Kota Bengkulu Berdasarkan Kecepatan Gelombang Geser

Aisyah Athiyyah Ashma^{1*}, Suko Prayitno Adi¹, Oriza Sativa², Aditya Setyo Rahman²

¹ Program Studi Sarjana Terapan Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia.

² Bidang Seismologi Teknik, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3113>

Article Info

Received: August, 12th 2026

Revised : August, 31st 2026

Accepted: October, 1st 2026

Correspondence:

Aisyah Athiyyah Ashma

Phone: +62 85743351575

Abstract: This study maps the spatial variation in average shear-wave velocity to a depth of 30 m (V_{s30}) and evaluates liquefaction potential in Bengkulu City. The analysis used Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) data from 137 measurement points acquired by BMKG in 2022. Surface-wave records were reprocessed through dispersion-curve picking and inversion to obtain shear-wave velocity profiles to 30 m. Liquefaction potential was evaluated to 23 m using corrected shear-wave velocity (V_{s1}), cyclic stress ratio (CSR), cyclic resistance ratio (CRR), and factor of safety (FS). The analysis adopted an Mw 8.9 earthquake scenario, bedrock peak ground acceleration of 0.60 g, surface peak ground acceleration of 0.66–0.72 g, and groundwater depth of 0.5 m. V_{s30} ranged from 85.6 to 488.9 m/s. Values of $FS \leq 1$ occurred at 102 locations (74.5%), with 97 locations first reaching this threshold at depths of 1–5 m; the overall initial depth ranged from 1 to 17.9 m. Thirty-five locations did not show $FS \leq 1$, including 30 outside the empirical calculation domain. Geological, CPT/SPT, historical, and two-dimensional cross-section comparisons showed consistency with documented liquefaction in Lempuing.

Keywords: Bengkulu City; Factor Of Safety; Liquefaction; Shear-Wave Velocity.

Citation:

Ashma, A. A., Adi, S. P., Sativa, O., & Rahman, A. S. (2026). Analisis Potensi Likuefaksi di Kota Bengkulu Berdasarkan Kecepatan Gelombang Geser. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5973–5979. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3113>

Pendahuluan

Kota Bengkulu berada di pesisir barat Sumatra dan berhadapan langsung dengan sistem subduksi Sunda. Kondisi tektonik regionalnya dipengaruhi oleh zona *megathrust* Sumatra, zona *backthrust* Mentawai, dan Sesar Sumatra, sehingga Bengkulu memiliki tingkat seismisitas yang tinggi (Mukti et al., 2012; Natawidjaja et al., 2017). Gempa bumi Bengkulu–Enggano tahun 2000 dan Bengkulu–Mentawai tahun 2007 menunjukkan bahwa sumber gempa bumi di sekitar wilayah ini mampu menghasilkan kerusakan luas dan bahaya ikutan khususnya pada wilayah dengan endapan pesisir (Pusat Studi Gempa Nasional [PuSGeN], 2024). Atlas Zona Likuefaksi Indonesia juga menempatkan sebagian

kawasan pesisir Bengkulu pada zona kerentanan likuefaksi yang perlu diperhatikan (ESDM, 2019). Kajian respons seismik terbaru menunjukkan bahwa kondisi situs lokal dapat memperbesar respons permukaan terhadap skenario gempa bumi *megathrust* (Fahrezi et al., 2025).

Salah satu bahaya ikutan yang rawan terjadi adalah likuefaksi, yaitu berkurangnya kekuatan tanah jenuh akibat peningkatan tekanan air pori selama pembebanan siklik. Kerentanan meningkat pada lapisan pasir lepas, muka air tanah dangkal, dan guncangan kuat berdurasi panjang. Earthquake Engineering Research Institute (EERI, 2007) mendokumentasikan adanya semburan air

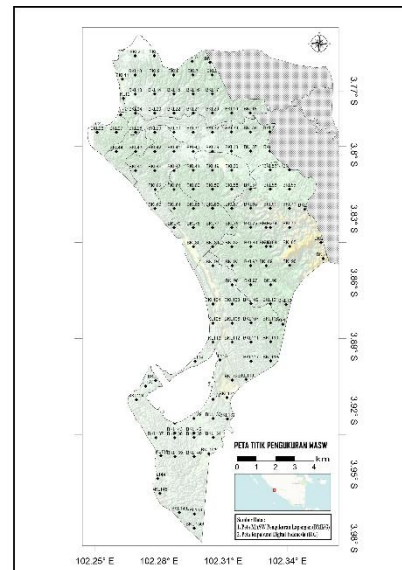
dan pasir, retakan lantai dan fondasi, penurunan diferensial, serta kemiringan bangunan di Lempuing setelah kejadian gempa bumi Bengkulu 2007. Penelitian geoteknik di pesisir Bengkulu juga mengidentifikasi lapisan pasir lepas pada kedalaman dangkal dan kondisi kritis pada lapisan yang lebih dalam (Mase, 2017; Mase, 2018). Model spasial kerentanan tanah pesisir turut menunjukkan pentingnya variasi kondisi lokal dalam penilaian bahaya likuefaksi (Misliniyati & Amrina, 2024).

Evaluasi likuefaksi biasanya menggunakan data *Standard Penetration Test* (SPT) atau *Cone Penetration Test* (CPT), tetapi cakupan data bor sering terbatas pada skala kota. Kecepatan gelombang geser (V_s) menerapkan pendekatan nondestruktif untuk menggambarkan kekakuan dinamik tanah dan dapat diperoleh secara spasial menggunakan *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW). Studi sebelumnya di Kota Bengkulu menggunakan V_s sebagai indikator awal dan menunjukkan bahwa lapisan dengan V_s rendah cenderung lebih rentan, tetapi belum menghitung beban dan ketahanan siklik secara kuantitatif melalui CSR, CRR, dan FS (Setiawan et al., 2023). Nilai V_s rendah bukan bukti tunggal likuefaksi, kondisi kejenuhan, tegangan efektif, dan beban gempa bumi tetap harus diperhitungkan (Andrus et al., 2004; Teixeira, 2024).

Penelitian ini memetakan variasi V_{s30} pada 137 titik MASW dan mengevaluasi potensi likuefaksi berdasarkan profil V_s per kedalaman. Evaluasi dilakukan menggunakan prosedur Andrus et al. (2004). Analisis diarahkan untuk menentukan lokasi serta kedalaman awal lapisan dengan $FS \leq 1$, kemudian menguji konsistensinya terhadap kondisi geologi, data CPT/SPT, dan kejadian historis likuefaksi.

Metode

Wilayah penelitian mencakup Kota Bengkulu pada koordinat sekitar 3,753–3,975° LS dan 102,252–102,357° BT. Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa rekaman MASW pada 137 titik hasil akuisisi Bidang Seismologi Teknik BMKG tahun 2022. Rekaman multikanal diproses menggunakan SeisImager/SW (Geometrics, Inc., n.d.). Modul Pickwin digunakan untuk mentransformasi data ke domain frekuensi-kecepatan dan memilih energi dominan gelombang Rayleigh. Kurva dispersi kemudian diinversi secara iteratif dengan WaveEq hingga kurva teoritis mendekati kurva hasil pengamatan. Kualitas solusi dievaluasi melalui nilai misfit/RMS. Inversi gelombang permukaan bersifat non-unik; karena itu, profil V_s ditafsirkan sebagai salah satu model bawah permukaan yang konsisten dengan kurva dispersi dan asumsi model awal. Persebaran seluruh titik pengukuran ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi dan persebaran 137 titik pengukuran MASW di Kota Bengkulu.

Nilai V_{s30} dihitung sebagai rata-rata harmonik berbobot ketebalan lapisan sampai kedalaman 30 m sebagaimana Persamaan (1). Nilai ini digunakan untuk klasifikasi situs berdasarkan SNI 1726:2019, sedangkan profil V_s per satu meter digunakan untuk evaluasi likuefaksi.

$$V_{s30} = 30 / \sum(h_i / V_{si}) \quad (1)$$

Analisis likuefaksi dibatasi sampai kedalaman 23 m mengikuti domain faktor reduksi tegangan pada prosedur Andrus et al. (2004). Tegangan vertikal total dihitung dari berat material di atas titik analisis, sedangkan tegangan efektif diperoleh setelah mengurangi tekanan air pori sesuai prinsip tegangan efektif (Terzaghi et al., 2014). Perhitungan menggunakan berat isi tanah di atas muka air, berat isi jenuh, dan berat isi air berdasarkan Terzaghi et al. (2014). Kedalaman muka air tanah dianggap sama yaitu 0,5 m. Nilai tersebut dipilih sebagai pendekatan penyaringan konservatif, yaitu mendekati batas dangkal rentang sekitar 0,5–4 m yang dilaporkan Soebowo et al. (2008) dan kondisi sekitar 0,3–0,5 m pada lokasi pesisir yang dikaji Mase (2017). Nilai seragam ini merupakan penyederhanaan dan tidak dimaksudkan menggantikan variasi muka air tanah aktual secara lateral, musiman, maupun akibat pasang surut.

Beban gempa bumi menggunakan skenario magnitudo M_w 8,9 sesuai skenario maksimum segmen *megathrust* di sekitar Kota Bengkulu (PuSGeN, 2024). PGA batuan dasar pada seluruh titik adalah 0,60 g. Setelah dikoreksi dengan koefisien situs SNI 1726:2019, PGA permukaan yang digunakan menjadi 0,72 g untuk kelas situs SC serta 0,66 g untuk kelas situs SD dan SE (Badan Standardisasi Nasional, 2019). CSR dihitung dari percepatan permukaan, rasio tegangan vertikal total

terhadap efektif, dan faktor reduksi tegangan sebagaimana Persamaan (2).

$$CSR = 0,65(a_{\max}/g)(\sigma_v/\sigma'_v)r_d \quad (2)$$

Nilai Vs dikoreksi terhadap tegangan overburden untuk menghasilkan Vs₁. CRR dihitung berdasarkan hubungan empiris CRR-Vs₁ dari Andrus et al. (2004), *magnitude scaling factor* (MSF), batas Vs₁* sebesar 215 m/s, serta faktor umur tanah K_{α1} dan K_{α2}. MSF dihitung berdasarkan Persamaan (3).

$$MSF = (M_w/7,5)^{-2,56} \quad (3)$$

Sehingga untuk Mw 8,9 diperoleh MSF = 0,645. Sebanyak 130 profil menggunakan K_{α1} = 1,00 dan K_{α2} = 1,00. Tujuh profil pada Formasi Bintunan berumur Pleistosen menggunakan K_{α1} = 0,61 dan K_{α2} = 1,10 sebagai pendekatan konservatif. Nilai K_{α1} didasarkan pada koreksi umur Pleistosen yang dirangkum Andrus et al. (2004) dari Ohta dan Goto (1978) serta Rollins et al. (1998), sedangkan K_{α2} = 1,10 menggunakan batas bawah pengaruh umur menurut Arango et al. (2000). Faktor keamanan dihitung menggunakan Persamaan (4).

$$FS = CRR / CSR \quad (4)$$

Lapisan dengan FS ≤ 1 diklasifikasikan berpotensi mengalami likuefaksi, sedangkan FS > 1 menunjukkan ketahanan siklik lebih besar daripada beban gempa bumi sehingga tidak berpotensi mengalami likuefaksi. Apabila K_{α1}Vs₁ mencapai atau melampaui Vs₁*, CRR dan FS tidak dihitung karena lapisan berada di luar domain empiris persamaan; kondisi tanpa nilai FS tidak ditafsirkan otomatis sebagai aman. Parameter utama evaluasi diringkas pada Tabel 1. Peta spasial disusun menggunakan Surfer dari 137 titik MASW. Validasi dilakukan menggunakan peta geologi, hasil CPT/SPT terdahulu, riwayat likuefaksi, dan penampang dua dimensi di Lempuing.

Tabel 1: Parameter utama evaluasi likuefaksi

Parameter	Nilai
Jumlah titik MASW	137 titik
Kedalaman profil Vs	0–30 m
Kedalaman evaluasi FS	1–23 m
Skenario gempa bumi	Mw 8,9
PGA batuan dasar	0,60 g
PGA permukaan	0,66–0,72 g
MSF (Mw 8,9)	0,645
Muka air tanah	0,5 m
Batas Vs ₁ *	215 m/s

Hasil dan Diskusi

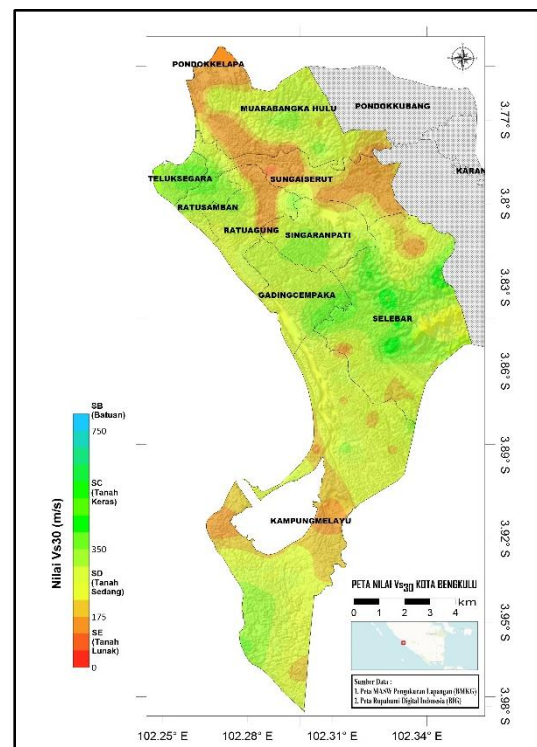
Variasi Vs₃₀ dan Struktur Lapisan

Hasil inversi menunjukkan Vs₃₀ antara 85,6 dan 488,9 m/s, dengan nilai terendah pada BKL 34 dan tertinggi pada BKL 72. Distribusi kelas situs pada 137 titik ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan penelitian

ini, wilayah Kota Bengkulu didominasi oleh kelas situs SD atau tanah sedang. Rentang Vs₃₀ yang lebar menginterpretasikan heterogenitas lateral kondisi bawah permukaan Kota Bengkulu.

Tabel 2: Klasifikasi Vs₃₀ pada 137 titik pengukuran

Kelas situs	Jumlah	Persentase
SC	18	13,1%
SD	93	67,9%
SE	26	19,0%



Gambar 2. Distribusi spasial Vs₃₀ di Kota Bengkulu.

Gambar 2 memperlihatkan bahwa zona dengan Vs₃₀ rendah banyak ditemui pada bagian utara, utara-tengah, dan beberapa bagian selatan. Nilai lebih tinggi cenderung terkonsentrasi pada bagian tengah hingga timur, terutama di sekitar Singaran Pati, Gading Cempaka, dan Selebar, masih terdapat sebagian kecil yang memiliki kecepatan rendah. Pola ini konsisten dengan perubahan lateral endapan Kuartar dan satuan yang lebih tua di Kota Bengkulu. Kisaran tersebut juga sebanding dengan kajian Mase dan Keawsawasvong (2022) yang menempatkan sebagian wilayah pada kelas situs menengah.

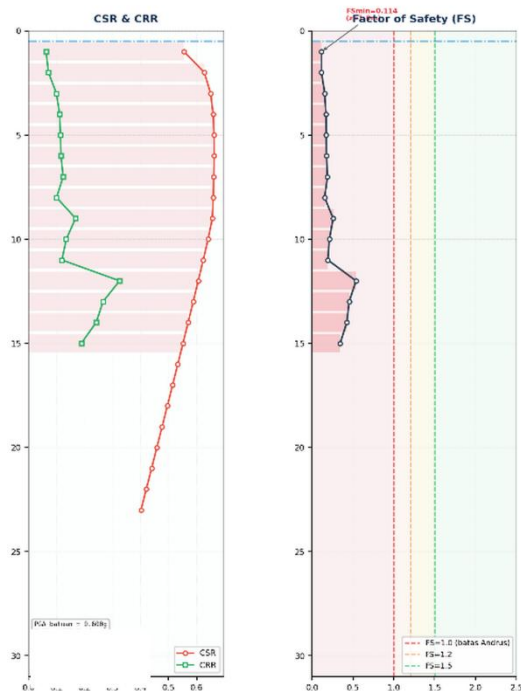
Vs₃₀ hanya menggambarkan kekakuan rata-rata sampai 30 m dan dapat menyamakan lapisan lunak yang tipis. Sebagai contoh adalah titik BKL 82 yang memiliki Vs₃₀ 346,8 m/s, tetapi Vs dekat permukaan masih sekitar 190 m/s sebelum meningkat hingga sekitar 480 m/s pada lapisan menengah. Sebaliknya, BKL 04 memiliki Vs₃₀ 213,9 m/s dengan Vs sekitar 117–

191 m/s hingga kedalaman 10 m. Perbedaan distribusi vertikal ini menjelaskan mengapa dua titik dalam kelas situs yang sama dapat memberikan hasil evaluasi likuefaksi berbeda; profil V_s per kedalaman lebih informatif daripada V_{s30} tunggal untuk merepresentasikan lapisan rentan. Pendekatan ini sejalan dengan Lubis et al. (2025) yang memetakan V_s pada berbagai kedalaman (V_{s10} hingga V_{s50}) di Kecamatan Kampung Melayu dan menunjukkan bahwa variasi V_s terhadap kedalaman memberikan gambaran ketahanan jenis tanah pada tiap kedalaman, sehingga tidak cukup diwakili oleh satu nilai V_{s30} .

Kecepatan Terkoreksi dan Faktor Keamanan

Koreksi tegangan overburden menghasilkan nilai minimum 58,13 m/s, maksimum 580,97 m/s, dan rata-rata 233,74 m/s. Batas V_{s1}^* 215 m/s digunakan sebagai batas penerapan hubungan empiris CRR- V_{s1} untuk material yang sesuai dengan domain metode. Lapisan dengan V_{s1} di bawah batas tersebut tetap harus dibandingkan terhadap CSR; V_{s1} rendah tidak dapat dijadikan bukti tunggal bahwa likuefaksi akan terjadi karena pemicunya merupakan interaksi antara kekakuan, kejenuhan, tegangan efektif, dan beban siklik (Teixeira, 2024). Profil contoh BKL 04 ditampilkan pada Gambar 3.

BKL 04: CSR, CRR, dan Factor of Safety (FS)



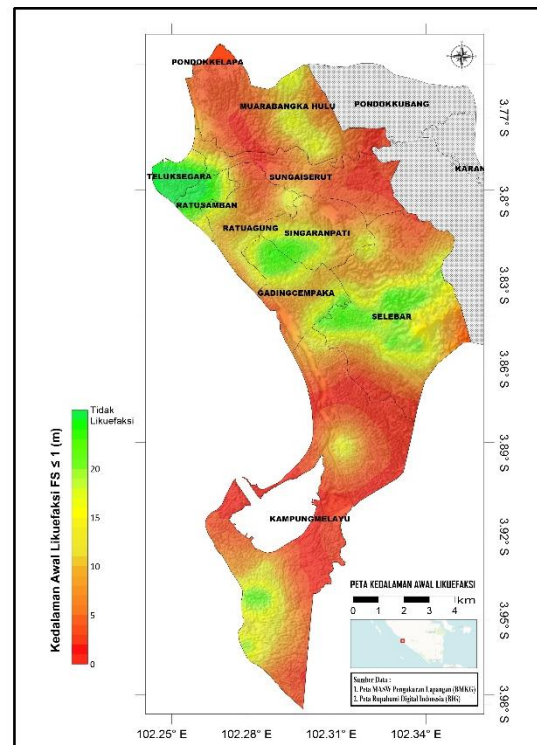
Gambar 3. Profil CSR, CRR, dan FS pada titik BKL 04; parameter skenario diringkas pada Tabel 1.

Pada BKL 04, CRR lebih kecil daripada CSR pada kedalaman 1–15 m sehingga seluruh interval tersebut memiliki $FS \leq 1$; nilai minimum FS sebesar 0,114 menunjukkan ketahanan siklik jauh di bawah beban

gempa bumi. Pada kedalaman 16–23 m, $K\alpha_1 V_{s1}$ telah mencapai batas V_{s1}^* sehingga CRR dan FS tidak dihitung. BKL 02 memiliki nilai V_{s30} 109,6 m/s, V_s pada kedalaman 1–17 m umumnya di bawah sekitar 110 m/s, dan $FS \leq 1$ muncul menerus hingga kedalaman 23 m dengan FS minimum 0,025 pada kedalaman 10 m. Sebaliknya, seluruh lapisan BKL 82 berada di luar domain CRR- V_{s1} karena nilai terkoreksinya telah mencapai batas atas.

Secara keseluruhan, 102 dari 137 titik (74,5%) memiliki minimal satu lapisan dengan $FS \leq 1$. Sebanyak 96 titik menunjukkan interval rentan yang menerus, sedangkan enam titik hanya pada interval tertentu. Dari 35 titik yang tidak menunjukkan $FS \leq 1$, sebanyak 30 titik berada di luar domain empiris karena $K\alpha_1 V_{s1}$ mencapai atau melampaui V_{s1}^* . Tiga titik memiliki FS minimum $> 1,5$, satu titik berada pada $1,2 \leq FS \leq 1,5$, dan satu titik menunjukkan kondisi marginal. Oleh sebab itu, area tanpa FS rendah tidak dapat langsung direpresentasikan sebagai zona bebas likuefaksi; penerapan batas empiris perlu dievaluasi dengan informasi litologi, *finer content*, sementasi, dan kejenuhan (Kayen et al., 2013).

Kedalaman Awal Potensi Likuefaksi



Gambar 4. Kedalaman awal lapisan dengan $FS \leq 1$.

Kedalaman pertama ditemukannya $FS \leq 1$ berkisar 1–17,9 m. Sebanyak 97 titik mulai menunjukkan potensi likuefaksi pada kedalaman 1–5 m, dua titik pada interval lebih dari 5–10 m, satu titik pada interval lebih dari 10–15 m, dan dua titik pada kedalaman lebih dari 15 m. Dominasi interval 1–5 m menunjukkan bahwa lapisan

dengan ketahanan siklik rendah umumnya berada dekat permukaan.

Gambar 4 menunjukkan kedalaman kemunculan pertama $FS \leq 1$. Kedalaman awal dangkal muncul pada sebagian Sungai Serut, Pondok Kelapa, bagian selatan Gading Cempaka, dan sebagian besar Kampung Melayu. Kedalaman lebih besar terdapat secara lokal di Muara Bangkahulu, Ratu Agung, Singaran Pati, Selebar, dan bagian selatan kota. Sebagian lokasi yang ditunjukkan oleh warna hijau dapat berarti nilai FS berada di luar domain persamaan empiris.

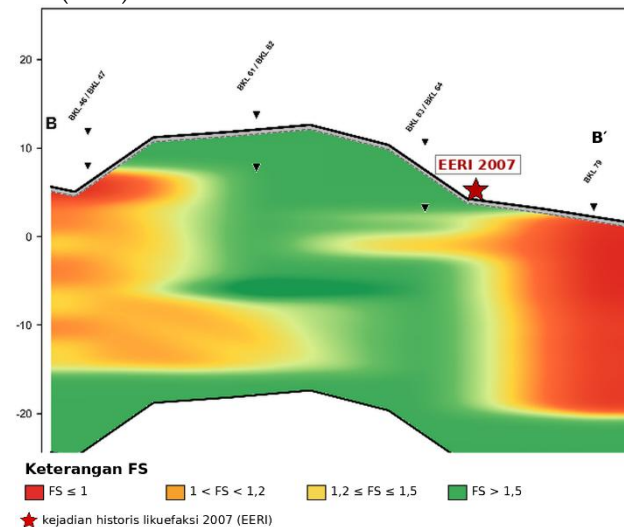
Pola kedalaman tersebut sejalan dengan penyelidikan geoteknik terdahulu. Soebowo et al. (2008) menemukan lapisan rentan setebal sekitar 0,3–2 m yang mulai dijumpai pada kedalaman 0,7–6 m, sedangkan Mase (2018) mengidentifikasi pasir lepas pada kedalaman sekitar 0–1,5 m dan kondisi kritis pada lapisan yang lebih dalam. Pada hasil penelitian ini, 97 dari 102 titik yang memiliki $FS \leq 1$ (95,1%) pertama kali mencapai ambang tersebut pada kedalaman 1–5 m. Hal ini menunjukkan bahwa mayoritas kedalaman awal hasil MASW menunjukkan hasil yang hampir selaras dengan rentang kedalaman rentan 0,7–6 m yang dilaporkan Soebowo et al. (2008). Temuan ini juga sejalan dengan evaluasi likuefaksi di pesisir barat Kota Bengkulu oleh Valetta et al. (2025), yang melaporkan bahwa likuefaksi berpotensi terjadi pada kedalaman dangkal, terutama pada lapisan pasir pertama dan kedua, dengan pola yang konsisten antara analisis numerik dan empiris.

Validasi Geologi dan Kejadian Historis

Bagian barat Kota Bengkulu, termasuk pesisir dan Lempuing, didominasi aluvium dan undak aluvium Kuartar yang tersusun atas pasir, lanau, lempung, serta kerikil-pasir, sedangkan bagian timur lebih banyak dipengaruhi satuan yang lebih tua dan relatif kompak (Pusat Survei Geologi, 2007). Material lepas di kawasan pesisir berasosiasi dengan muka air tanah dangkal sekitar 0,5–4 m pada penyelidikan geoteknik terdahulu (Soebowo et al., 2008). Pola kerentanan spasial pesisir yang dikemukakan Misliniyati dan Amrina (2024) juga mendukung pentingnya kontrol geologi permukaan terhadap potensi likuefaksi. Hasil penelitian ini memperlihatkan lebih banyak lapisan FS rendah pada endapan Kuartar muda sehingga hubungan antara geologi permukaan, kekakuan dinamik, dan potensi likuefaksi bersifat konsisten.

Sumber pembanding geoteknik berasal dari Mase (2018) untuk data SPT dan V_s di Anggut, Pantai Panjang, dan Lempuing, serta Soebowo et al. (2008) untuk pemboran, CPT, dan CPTu. Mase (2018) tidak mencantumkan koordinat setiap borehole, sehingga pencocokan dilakukan secara representatif berdasarkan posisi relatif pada peta, bukan korelasi satu-ke-satu. Di

Lempuing, BKL 63 memiliki V_{s30} 247,4 m/s dengan $V_{s1} \leq 215$ m/s dan $FS \leq 1$ mulai kedalaman 1 m, konsisten dengan lapisan pasir lepas sekitar 0–1,5 m pada Mase (2018). Di sekitar Pantai Panjang, BKL 45 memiliki V_{s30} 224,3 m/s, $V_{s1} \leq 215$ m/s mulai 4,38 m, dan $FS \leq 1$ mulai 5 m. BKL 62, di antara Pantai Panjang dan Lempuing, menunjukkan zona kritis sekitar 13,88–14,96 m, sejalan dengan kondisi kritis lapisan 1,5–20 m yang dilaporkan Mase (2018).



Gambar 5. Penampang FS lintasan B–B' di Lempuing. Bintang merah menandai sektor kejadian likuefaksi 2007 pada koordinat EERI 102,28473° BT dan 3,82799° LS.

Gambar 5 memperlihatkan validasi spasial pada lintasan B–B' di Lempuing. Garis lintasan berada pada bujur sekitar 102,285° BT, sangat dekat dengan koordinat kejadian likuefaksi EERI (2007), yaitu 102,28473° BT dan 3,82799° LS. Zona $FS \leq 1$ mulai berkembang dominan pada jarak sekitar 2,4–2,5 km dari titik B dan berlanjut ke arah B'. Berdasarkan selisih elevasi permukaan dan elevasi lapisan, zona FS rendah berkembang dari dekat permukaan hingga sekitar 20 m di bawah permukaan setempat. Kesesuaian horizontal dengan lokasi kejadian historis serta kesesuaian vertikal dengan lapisan kritis pada penelitian terdahulu memperkuat konsistensi fisik hasil, meskipun bukan validasi titik-ke-titik yang lengkap.

Peta ini dapat digunakan sebagai langkah awal pemetaan potensi likuefaksi. Namun peta ini masih memiliki beberapa keterbatasan seperti, penggunaan satu kedalaman muka air tanah 0,5 m untuk seluruh kota, satu skenario gempa bumi deterministik, korelasi berat isi berdasarkan karakteristik tanah, faktor umur endapan yang tidak didukung penentuan usia absolut pada semua titik, keterbatasan domain empiris $CRR-V_{s1}$, dan interpolasi antar titik MASW. Selain itu, metode V_s tidak mengidentifikasi litologi, *finer content*, atau sementasi secara langsung. Oleh karena itu, zona $FS \leq 1$ sebaiknya dipakai untuk prioritas investigasi, bukan

sebagai pengganti CPT/SPT, uji bor, uji laboratorium, atau evaluasi geoteknik tapak.

Implikasi Mitigasi dan Penggunaan Hasil

Hasil penelitian dapat digunakan sebagai informasi penyaringan awal untuk mendukung perencanaan tata ruang, penentuan prioritas penyelidikan geoteknik, perencanaan jalur evakuasi, dan pengembangan infrastruktur tahan gempa bumi di Kota Bengkulu. Wilayah dengan $FS \leq 1$ pada kedalaman dangkal perlu diprioritaskan untuk verifikasi melalui CPT/SPT, uji bor, dan data muka air tanah aktual. Pada tahap perencanaan teknis, hasil tersebut dapat membantu mengarahkan kajian pemilihan jenis fondasi serta kebutuhan perbaikan tanah seperti pemadatan atau peningkatan drainase. Peta tidak dimaksudkan sebagai satu-satunya dasar desain fondasi atau penetapan zonasi final, tetapi sebagai bahan komunikasi risiko dan penentuan lokasi kajian lanjutan yang lebih rinci.

Kesimpulan

Nilai V_{s30} pada 137 titik di Kota Bengkulu berkisar 85,6–488,9 m/s dan menunjukkan kondisi bawah permukaan yang heterogen; kelas situs SD mendominasi sebagaimana Tabel 2. Berdasarkan skenario Mw 8,9, PGA batuan dasar 0,60 g, PGA permukaan 0,66–0,72 g, dan muka air tanah 0,5 m, sebanyak 102 titik (74,5%) memiliki sekurang-kurangnya satu lapisan dengan $FS \leq 1$. Dari titik tersebut, 97 lokasi mulai mencapai $FS \leq 1$ pada kedalaman 1–5 m dan kedalaman awal keseluruhan berkisar 1–17,9 m. Sebanyak 35 titik tidak menunjukkan $FS \leq 1$, tetapi 30 di antaranya berada di luar domain empiris sehingga tidak dapat langsung dikategorikan aman. Kesesuaian terhadap geologi, data CPT/SPT terdahulu, dan lokasi historis Lempuing mendukung penggunaan hasil sebagai penyaringan awal. Interpretasi tetap bersifat kondisional terhadap asumsi skenario gempa bumi, kedalaman muka air tanah, domain metode, dan interpolasi spasial.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Bidang Seismologi Teknik Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika yang telah menyediakan data pengukuran MASW serta kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika atas dukungan akademik selama penelitian. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Bapak Suko Prayitno Adi, Ibu Oriza Sativa, dan Bapak Aditya Setyo Rahman atas bimbingan selama penelitian dan penyusunan naskah.

Referensi

Andrus, R. D., Stokoe, K. H., & Juang, C. H. (2004). Guide for shear-wave-based liquefaction potential

evaluation. *Earthquake Spectra*, 20(2), 285–308. <https://doi.org/10.1193/1.1715106>

Arango, I., Lewis, M. R., & Kramer, C. (2000). Updated liquefaction potential analysis eliminates foundation retrofitting of two critical structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(1–4), 17–25. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00034-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00034-8)

Badan Standardisasi Nasional. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung (SNI 1726:2019). Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.

Earthquake Engineering Research Institute. (2007). Observations on the Southern Sumatra earthquakes of September 12–13, 2007. EERI Special Earthquake Report, November, 1–8.

ESDM. (2019). Atlas zona likuefaksi Indonesia. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Fahrezi, Z., Misliniyati, R., Amri, K., Mase, L. Z., & Hardiansyah. (2025). Prediction of megathrust impact on seismic response in Selebar District of Bengkulu City. *Jurnal PenSil*, 14(1), 50–64. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v14i1.50133>

Geometrics, Inc. (n.d.). SeisImager/SW [Computer software]. <https://www.geometrics.com/software/seisimager-sw/>

Kayen, R., Moss, R. E. S., Thompson, E. M., Seed, R. B., Cetin, K. O., Der Kiureghian, A., Tanaka, Y., & Tokimatsu, K. (2013). Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(3), 407–419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000743)

Lubis, A. R., Mase, L. Z., Amri, K., Misliniyati, R., & Supriani, F. (2025). Microzonation of soil resistance based on shear wave velocity variation: Case study of Kampung Melayu District, Bengkulu City. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 35(2), 59–72. <https://doi.org/10.55981/risetgeotam.2025.1361>

Mase, L. Z. (2017). Liquefaction potential analysis along coastal area of Bengkulu Province due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu earthquake. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 49(6), 721–736. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2>

Mase, L. Z. (2018). One dimensional site response analysis of liquefaction potential along coastal area of Bengkulu City, Indonesia. *Civil Engineering Dimension*, 20(2), 57–69. <https://doi.org/10.9744/ced.20.2.57-69>

Mase, L. Z., & Keawsawasvong, S. (2022). Seismic hazard maps of Bengkulu City, Indonesia, considering probabilistic spectral response for medium and stiff soils. *The Open Civil Engineering Journal*, 16(1), 1–15.

- <https://doi.org/10.2174/18741495-v16-e221021-2022-49>
- Misliniyati, R., & Amrina, E. (2024). Model spasial potensi kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu terhadap bahaya likuefaksi. *FROPIL (Forum Profesional Teknik Sipil)*, 11(1), 11-21. <https://doi.org/10.33019/fropil.v11i1.3837>
- Mukti, M. M. R., Singh, S. C., Deighton, I., Hananto, N. D., Moeremans, R., & Permana, H. (2012). Structural evolution of backthrusting in the Mentawai Fault Zone, offshore Sumatran forearc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(12), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2012GC004199>
- Natawidjaja, D. H., Bradley, K., Daryono, M. R., Aribowo, S., & Herrin, J. (2017). Late Quaternary eruption of the Ranau Caldera and new geological slip rates of the Sumatran Fault Zone in Southern Sumatra, Indonesia. *Geoscience Letters*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40562-017-0087-2>
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(2), 167-187. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060205>
- Pusat Survei Geologi. (2007). Peta geologi lembar Bengkulu, Sumatera. Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://geologi.esdm.go.id/geomap/pages/preview/peta-geologi-lembar-bengkulu-sumatera>
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2024). Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2024. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Rollins, K. M., Evans, M. D., Diehl, N. B., & Daily, W. D. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(5), 396-405.
- Setiawan, A., Sholeha, D. Z., Kausari, A., & Hadi, A. I. (2023). Analisis potensi likuefaksi berdasarkan kecepatan gelombang seismik Kota Bengkulu. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 20(1), 80-93. <https://doi.org/10.20527/flux.v20i1.15243>
- Soebowo, E., Sarah, D., & Tohari, A. (2008). Geologi bawah permukaan kaitannya dengan potensi likuefaksi di daerah Bengkulu. *Pertemuan Ilmiah Tahunan IAGI ke-37*, 207-221.
- Teixeira, F. (2024). Mechanisms to explain soil liquefaction triggering, development, and persistence during an earthquake. *Earthquake Science*, 37(6), 558-573. <https://doi.org/10.1016/j.eqs.2024.07.003>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (2014). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Valetta, F. L., Mase, L. Z., Amri, K., Misliniyati, R., & Hardiansyah, H. (2025). Evaluation of liquefaction hazard in the west coastal area of Bengkulu City due to megathrust earthquake. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Teknologi*, 11(1a), 42-53. <https://doi.org/10.29303/jpft.v11i1a.9070>