

MODEL SPASIAL POTENSI KERENTANAN TANAH KAWASAN PESISIR KOTA BENGKULU TERHADAP BAHAYA LIKUIFAKSI

Rena MISLINIYATI^{1,2*}, Elita AMRINA²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

²Program Profesi Insinyur, Sekolah Pascasarjana Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Email korespondensi: rena_misliniyati@unib.ac.id

[diterima: 07 Februari 2023, disetujui: 20 Juni 2023]

ABSTRACT

This study evaluates the susceptibility of soil liquefaction in the coastal area of Bengkulu City. The evaluation was carried out using a probability approach that includes the contribution of all seismic hazard levels that potentially trigger liquefaction, interpreted by the magnitude and maximum acceleration parameters. The soil strength parameters were collected from 26 CPT points spread along the coastal area of Bengkulu City. This evaluation implements the results of the Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) for Bengkulu City, whereas the dominant earthquake source comes from the subduction zone of Sumatra Island. Determining the maximum acceleration at the surface refers to the amplification factor stated in SNI-1726-2019. The evaluation of soil susceptibility of the study area to liquefaction is presented by a Liquefaction Hazard Curve. This curve models the safety factor of liquefaction for each return period. Furthermore, the evaluation results are interpreted by a spatial model to comprehend the distribution of potential liquefaction hazards in the study area. The results show that for the return period of 475 years, the soil to a depth of 1 m is unsafe against liquefaction (the safety factor is less than 1) with a probability value of almost 100%. This indicates that the soil resistance parameters dominated by a value of less than 100 kg/cm² are considered incapable of earthquake load with a maximum acceleration of 0.44 g. Therefore, planning the structure of houses and roads with a foundation depth of more than 1 m should be recommended to reduce potential damage of liquefaction.

Key words: susceptibility of soil liquefaction, coastal area, Cone Penetration Test (CPT), spatial model.

INTISARI

Makalah ini menyajikan evaluasi potensi kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu terhadap bahaya likuifaksi. Evaluasi dilakukan dengan pendekatan probabilitas yang memasukkan kontribusi semua tingkat bahaya gempa yang berpotensi menimbulkan likuifaksi melalui interpretasi parameter magnitudo dan percepatan maksimum. Parameter tahanan tanah dikumpulkan dari 26 titik uji sondir yang tersebar di sepanjang kawasan pesisir Kota Bengkulu. Evaluasi ini menggunakan hasil analisis *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)* Kota Bengkulu, dimana sumber gempa dominan adalah zona subduksi Pulau Sumatera. Penentuan besarnya nilai percepatan gempa di permukaan tanah mengacu pada faktor amplifikasi yang ditetapkan dalam SNI-1726-2019. Hasil evaluasi kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi di lokasi studi disajikan dalam bentuk Kurva Bahaya Likuifaksi. Kurva ini memodelkan secara langsung besarnya faktor keamanan terhadap likuifaksi untuk setiap periode ulang. Interpretasi hasil evaluasi kemudian disajikan dalam bentuk model spasial agar lebih mudah dalam memahami karakteristik nilai sebaran bahaya likufaksi di lokasi studi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pada periode ulang 475 tahun, lapisan tanah hingga kedalaman 1 m berada dalam kondisi tidak aman terhadap bahaya likuifaksi (faktor keamanan kurang dari 1) dengan nilai probabilitas hampir mencapai 100%. Hal ini mengindikasikan bahwa karakteristik nilai tahanan tanah yang kurang dari 100 kg/cm² pada kedalaman ini, dianggap tidak mampu memikul beban gempa dengan percepatan maksimum di permukaan yang mencapai 0,44 g. Oleh karena itu, perencanaan struktur bangunan rumah penduduk dan infrastruktur jalan dengan kedalaman pondasi lebih dari 1 m perlu direkomendasikan untuk mengurangi potensi kerusakan akibat likuifaksi.

Kata kunci: kerentanan tanah terhadap likuifaksi, kawasan pesisir, sondir (CPT), model spasial.

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan salah satu kota di Indonesia yang berada pada jalur seismik aktif (Mase dkk., 2021). Berdasarkan peta zonasi gempa Indonesia tahun 2017 menunjukkan bahwa nilai percepatan maksimum di batuan dasar (*Peak Base Acceleration*) Kota Bengkulu untuk periode ulang 475 tahun adalah sebesar 0,3 g hingga 0,6 g (PuSGeN, 2017). Besaran ini menunjukkan bahwa Kota Bengkulu relatif tidak aman terhadap bahaya gempa bumi terutama di kawasan wilayah pesisir yang secara geografis lebih dekat dengan sumber gempa Subduksi *Megathrust* Pulau Sumatera (Mase, 2018; Misliniyati dkk., 2018). Selain itu, karakteristik tanah yang dominan merupakan tanah pasir jenuh air memicu kerentanan terjadinya bahaya likuifaksi di kawasan pesisir ketika gempa terjadi (Pryambodo dan Sudirman, 2019).

Likuifaksi telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kajian potensi bahaya gempa di wilayah dengan karakteristik tanah berupa pasir urai dan jenuh air (Nath dkk., 2018; Guler dkk., 2021). Dampak kerusakan dahsyat yang berpotensi ditimbulkan saat terjadi gempa, seperti halnya Gempa Palu tahun 2018, menjadikan fenomena likuifaksi sebagai bahasan menarik untuk dievaluasi (Pramaditya dan Fathani, 2020). Evaluasi potensi bahaya likuifaksi saat ini berkembang dari prosedur empiris yang menggunakan model deterministik ataupun probabilistik pada suatu level getaran gempa (Zhao dkk., 2022).

Studi tentang bahaya likuifaksi di wilayah Kota Bengkulu telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya Misliniyati dkk. (2013), Mase (2017), Farid dan Hadi (2018), dan Mase (2020a). Hasil beberapa studi ini menunjukkan bahwa pada kedalaman tanah dangkal, kawasan pesisir Kota Bengkulu berada dalam kondisi tidak aman terhadap bahaya likuifaksi. Akan tetapi, semua studi yang telah disebutkan di atas menggunakan model deterministik sebagai pendekatan dalam menganalisis

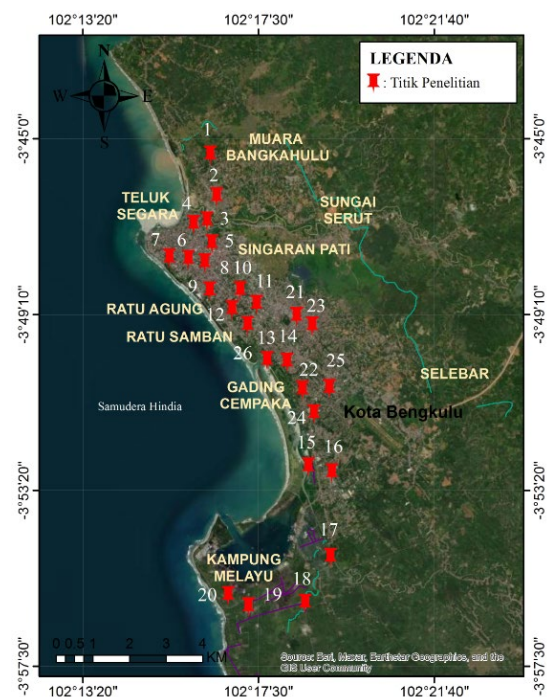
potensi likuifaksi. Model ini hanya menggunakan satu level getaran gempa saja, sehingga level getaran gempa lainnya yang juga berpotensi menimbulkan terjadinya likuifaksi tidak ikut dianalisis (Blonquist, 2020). Evaluasi yang dibangun akhirnya tidak dapat menentukan seberapa besar persentase tingkat probabilitas dan tingkat keamanan di setiap periode ulang likuifaksi yang berpotensi terjadi pada kawasan ini.

Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu dengan model probabilitas sebagai pendekatan analisis. Model probabilitas dianggap mampu menghasilkan evaluasi yang lebih konsisten dibanding model deterministik karena memasukkan kontribusi dari semua tingkat magnitudo gempa yang berpotensi terjadi di suatu kawasan.

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di kawasan pesisir Kota Bengkulu dengan sebaran data uji sondir (*Cone Penetration Test, CPT*) sebanyak 26 titik seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sebaran titik uji sondir di sepanjang lokasi penelitian.

Alat dan Data Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah alat uji sondir (CPT). Alat ini digunakan untuk mendapatkan data parameter tahanan tanah di lokasi Penelitian. Sementara itu, data parameter gempa lokasi penelitian diperoleh berdasarkan interpretasi Peta Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 (PuSGeN, 2017). Penentuan besarnya nilai percepatan gempa di permukaan tanah mengacu pada faktor amplifikasi yang ditetapkan dalam SNI-1726-2019. Sementara itu, variasi nilai percepatan gempa di setiap periode ulang ditentukan berdasarkan hasil analisis *Probabilistik Seismic Hazard Analysis* (PSHA) untuk Kota Bengkulu dengan sumber gempa dominan adalah zona subduksi *megathrust* Pulau Sumatera.

Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data parameter tahanan tanah dari hasil uji sondir dan data parameter beban gempa lokasi penelitian sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya. Setelah data uji sondir dan parameter beban gempa terkumpul, maka dilanjutkan dengan tahap analisis data guna mengevaluasi kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu terhadap bahaya likuifaksi. Evaluasi dilakukan berdasarkan model probabilitas yang memasukkan kontribusi semua tingkat bahaya gempa yang berpotensi menimbulkan likuifaksi. Uraian setiap tahapan penelitian yang dilalui dijelaskan di bawah ini.

Penentuan nilai q_{c1} di setiap kedalaman lapisan tanah

Uji sondir menghasilkan data parameter tahanan ujung konus (q_c) dan tahanan gesek selimut (f_s). Data sondir yang digunakan dalam evaluasi likuifaksi adalah nilai q_c . Nilai ini dipakai untuk menentukan besarnya parameter q_{c1} . Parameter q_{c1} diinterpretasikan sebagai parameter tahanan ujung konus (q_c) yang dinormalkan melalui Persamaan (1) (Boulanger dan Idriss, 2014).

$$q_{c1} = C_N \cdot q_c \quad (1)$$

Parameter C_N diekspresikan dalam Persamaan (2) (Boulanger dan Idriss, 2014).

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{1,338-0,249 (q_c)^{0,264}} \leq 1,7 \quad (2)$$

dimana:

σ'_{vo} = tegangan vertikal efektif tanah

P_a = tekanan 1 atmosfer (100kPa)

Penentuan nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) di setiap kedalaman lapisan tanah

Penentuan nilai CSR sebagai interpretasi parameter beban gempa lokasi studi dilakukan berdasarkan formula yang tersaji pada Persamaan (3). Pada tahap ini dilakukan analisis perhitungan nilai CSR di sepanjang kedalaman uji sondir berdasarkan parameter magnitudo dan percepatan gempa lokasi studi.

$$CSR_{M;\sigma'_{vc}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot \frac{r_d}{MSF} \quad (3)$$

dimana:

a_{max} = percepatan gempa maksimum di permukaan tanah

g = percepatan gravitasi

σ_{vo} = tegangan vertikal total awal

σ'_{vo} = tegangan vertikal efektif awal

r_d = faktor reduksi tegangan terhadap kedalaman tanah yang ditinjau

MSF = faktor skala magnitudo gempa

Pembuatan kurva bahaya likuifaksi berdasarkan model probabilitas

Faktor keamanan terhadap bahaya likuifaksi (FS_L) dapat ditentukan berdasarkan korelasi nilai *Cyclic Resistant Ratio* (CRR) terhadap nilai CSR seperti yang diekspresikan pada Persamaan (4).

$$FS_L = \frac{CRR_{M;\sigma'_{vc}}}{CSR_{M;\sigma'_{vc}}} \quad (4)$$

Parameter $CRR_{M;\sigma'_{vc}}$ menginterpretasikan nilai tahanan tanah untuk satu kondisi nilai magnitudo (M) dan tegangan vertikal efektif

(σ'_{vc}). Penentuan besarnya parameter ini dilakukan mengikuti Persamaan (5).

$$CRR_{M,\sigma'_{vc}} = CRR_{M=7,5;\sigma'_{vc}=1atm} \cdot MSF \cdot K_{\sigma} \quad (5)$$

dimana:

K_{σ} = faktor koreksi tegangan vertikal tanah

$$CRR_{M=7,5;\sigma'_{vc}=1atm} = \exp \left\{ \frac{q_{C1cs}}{113} + \left(\frac{q_{C1cs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{C1cs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{C1cs}}{137} \right)^4 - 2,80 \right\} \quad (6)$$

dengan

$$q_{C1cs} = q_{C1} + \Delta q_{C1} \quad (7)$$

dan

$$\Delta q_{C1} = \left(11,9 + \frac{q_{C1}}{14,6} \right) \cdot \exp \left(1,63 + \frac{9,7}{FC+2} - \left(\frac{15,7}{FC+2} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Nilai FC pada Persamaan (8) didefinisikan sebagai persentase kandungan butiran halus di dalam suatu lapisan tanah.

Analisis tingkat kejadian bahaya likuifaksi rata-rata yang berpotensi terjadi dalam kurun waktu satu tahun untuk nilai faktor keamanan sebesar 1 ($\Lambda_{FS_L^*}$) dilakukan mengikuti formula yang disajikan pada Persamaan (9). Hasil analisis ini selanjutnya diinterpretasikan dalam bentuk kurva bahaya likuifaksi yang menampilkan korelasi antara periode ulang dan besarnya faktor keamanan terhadap bahaya likuifaksi (Blonquist, 2020).

$$\Lambda_{FS_L^*} = \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{i=1}^{N_{a_{max}}} P[FS_L < FS_L^* | a_{max_i}, m_j] \Delta \lambda_{a_{max_i}, m_j} \quad (9)$$

dimana:

N_M = jumlah kenaikan magnitudo gempa

$N_{a_{max}}$ = jumlah kenaikan percepatan gempa maksimum

$\lambda_{a_{max_i}, m_j}$ = kenaikan nilai rata-rata terlampaui per-tahun (*rate*) untuk percepatan maksimum (a_{max_i}) dan magnitudo gempa (m_j)

$P[FS_L < FS_L^* | a_{max_i}, m_j]$ adalah probabilitas nilai faktor keamanan likuifaksi (FS_L) kurang dari FS_L^* (dimana $FS_L^*=1$) untuk setiap variasi nilai magnitudo dan percepatan gempa maksimum.

Periode ulang likuifaksi yang berpotensi terjadi ($T_{R,L}$) dapat dikorelasikan dengan tingkat kejadian rata-rata tak terlampaui dari $FS_L^*=1,0$ ($\Lambda_{FS_L^*=1}$), sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (10) (Blonquist, 2020).

$$T_{R,L} = \frac{1}{\Lambda_{FS_L^*=1}} \quad (10)$$

Penentuan nilai probabilitas kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi

Analisis nilai probabilitas kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi dilakukan dengan menggunakan formula yang diekspresikan pada Persamaan (11) (Arndt, 2017). Analisis ini dilakukan untuk semua variasi nilai magnitudo dan percepatan gempa di sepanjang kedalaman uji sondir pada 26 titik yang tersebar di lokasi studi.

$$P_L = \Phi \left[-\frac{A-B}{\sigma_{\epsilon}} \right] \quad (11)$$

dimana:

$$A = \frac{q_{C1cs}}{113} - \left(\frac{q_{C1cs}}{1000} \right)^2 + \left(\frac{q_{C1cs}}{140} \right)^3 - \left(\frac{q_{C1cs}}{137} \right)^4 \quad (12)$$

$$B = 2,60 + \ln(CSR_{M=7,5,\sigma'_{vc}=1atm}) \quad (13)$$

Nilai standar deviasi (σ_{ϵ}) yang diterapkan adalah sebesar 0,506 untuk mengakomodir ketidakpastian model dan parameter yang digunakan dalam persamaan ini (Arndt, 2017).

Pembuatan model spasial Peta Mikrozonasi Bahaya Likuifaksi

Tahap akhir dari penelitian ini adalah menampilkan hasil analisis evaluasi bahaya likuifaksi di kawasan pesisir Kota Bengkulu dalam model spasial yang berbentuk peta mikrozonasi. Interpretasi hasil analisis dalam model spasial ini memberi kemudahan dalam memahami karakteristik nilai sebaran bahaya

likuifaksi di lokasi studi. Peta ini masing-masing menyajikan dua informasi hasil analisis, yaitu peta faktor keamanan dan peta probabilitas kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi kawasan pesisir Kota Bengkulu untuk periode ulang 475 tahun pada kedalaman 1 m. Pemilihan hasil analisis pada periode ulang dan kedalaman ini didasarkan pada kebutuhan perencanaan dan evaluasi pondasi dangkal pada struktur bangunan rumah dan infrastruktur jalan di kawasan pesisir Kota Bengkulu.

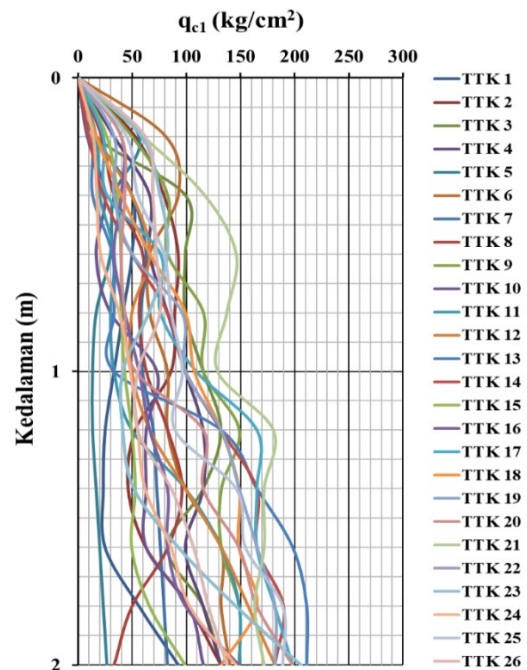
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Parameter Tahanan Ujung Konus yang Dinormalisasi (q_{c1})

Gambar 2 menampilkan hasil perhitungan nilai tahanan ujung konus yang dinormalisasi (q_{c1}) hingga kedalaman 2 m untuk 26 titik uji sondir. Sajian data tahanan ujung hingga kedalaman ini mengacu pada kepentingan analisis bahaya likuifaksi yang berpotensi merusak bangunan dengan struktur fondasi dangkal. Gambar ini menunjukkan karakteristik nilai tahanan tanah di lokasi studi yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman. Secara umum, lapisan tanah di kawasan pesisir Kota Bengkulu dapat diklasifikasikan sebagai tanah berkekuatan sedang (kelas situs S_D), dimana nilai kecepatan gelombang geser (V_s) berkisar antara 175 sampai 350 m/detik (Mase, 2020a).

Analisis Nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR)

Analisis nilai CSR dilakukan berdasarkan nilai percepatan gempa maksimum di batuan dasar (*Peak Base Acceleration, PBA*) dan percepatan maksimum gempa di permukaan (*Peak Ground Surface Acceleration, PGA*). Parameter *PBA* diperoleh berdasarkan hasil analisis probabilitas bahaya gempa (*PSHA*) Kota Bengkulu. Parameter *PGA* diperoleh dengan mengalikan nilai *PBA* terhadap suatu faktor amplifikasi yang disyaratkan dalam SNI-1726-2019.

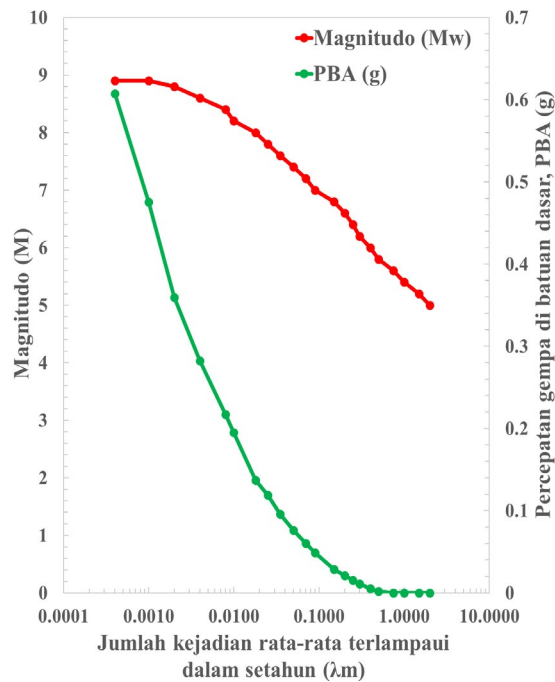


Gambar 2. Grafik nilai tahanan ujung konus yang dinormalisasi (q_{c1}) hingga kedalaman 2 m pada 26 titik uji sondir (CPT).

Karakteristik magnitudo (M_w) dan percepatan gempa maksimum di batuan dasar (PBA)

Hasil analisis probabilitas bahaya gempa (*PSHA*) Kota Bengkulu menunjukkan bahwa sumber gempa yang dominan berpengaruh terhadap kondisi seismotektonik Kota Bengkulu adalah zona subduksi megathrust Pulau Sumatera (Misliniyati dkk., 2018; Mase dan Keawsawsvong, 2022).

Gambar 3 menampilkan variasi nilai magnitudo dan percepatan gempa yang berpotensi terjadi di Kota Bengkulu untuk sumber gempa subduksi megathrust Pulau Sumatera sebagai hasil analisis *PSHA*. Variasi nilai magnitudo dan percepatan gempa ini selanjutnya digunakan untuk analisis probabilitas likuifaksi di lokasi studi. Variasi nilai magnitudo gempa yang digunakan adalah $M_w \geq 5$ karena likuifaksi diasumsikan berpotensi terjadi pada besaran magnitudo ini (Green dan Bommer, 2019).



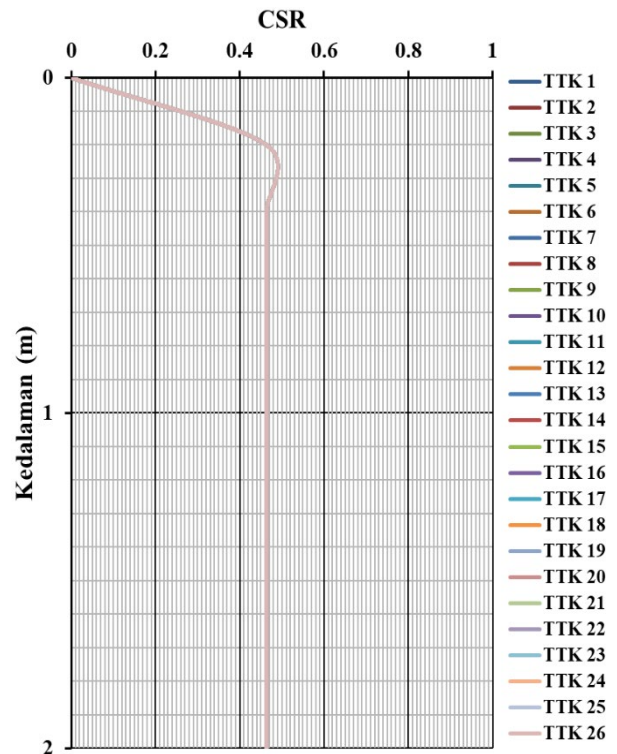
Gambar 3. Kurva potensi bahaya gempa Kota Bengkulu akibat sumber gempa subduksi megathrust Pulau Sumatera.

Karakteristik nilai CSR

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya bahwa tanah permukaan kawasan pesisir Kota Bengkulu hingga kedalaman 2 m dapat diklasifikasikan ke dalam kelas tanah sedang (S_D). Kelas tanah S_D dominan dijumpai pada kawasan ini dengan konsistensi tanah berupa tanah pasir, lanau, dan lempung (Mase, 2020a). Menurut SNI-1726-2019, nilai faktor amplifikasi percepatan gempa untuk kelas tanah S_D adalah sebesar 1,1. Nilai ini mengacu pada karakteristik tanah sedang dengan nilai kecepatan gelombang geser yang lebih kecil dari batuan dasar, sehingga gelombang gempa yang merambat pada lapisan tanah ini cenderung akan mengalami pembesaran nilai percepatan maksimum. Oleh karena itu, besarnya nilai percepatan gempa di permukaan (PGA) ditentukan dengan mengalikan nilai PBA dengan faktor ini. Nilai PGA ini selanjutnya diinterpretasikan sebagai a_{max} dalam perhitungan nilai CSR .

Variabel persamaan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang terjadi pada suatu lapisan tanah pada kedalaman (h) tertentu terdiri atas

tekanan total vertikal (σ_{vo}), faktor reduksi fleksibilitas tanah terhadap kedalaman (r_d) dan percepatan gempa maksimum (a_{max}). Nilai variabel-variabel ini dinormalisasi terhadap tekanan vertikal efektif tanah seperti yang ditunjukkan Persamaan (3). Gambar 4 menampilkan hasil perhitungan CSR untuk satu nilai $M_w = 7,9$ dan $a_{max} = 0,44$ g hingga kedalaman 2m.

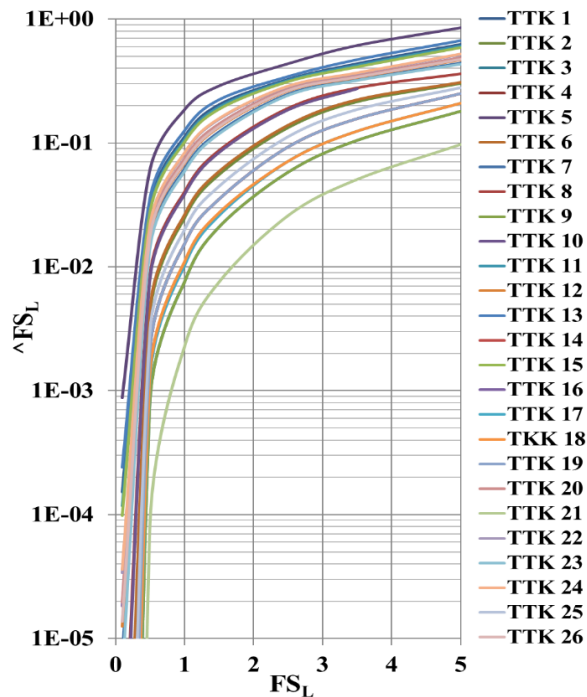


Gambar 4. Grafik korelasi nilai CSR terhadap kedalaman tanah hingga 2 m untuk satu nilai $M_w = 7,9$ dan $a_{max} = 0,44$ g.

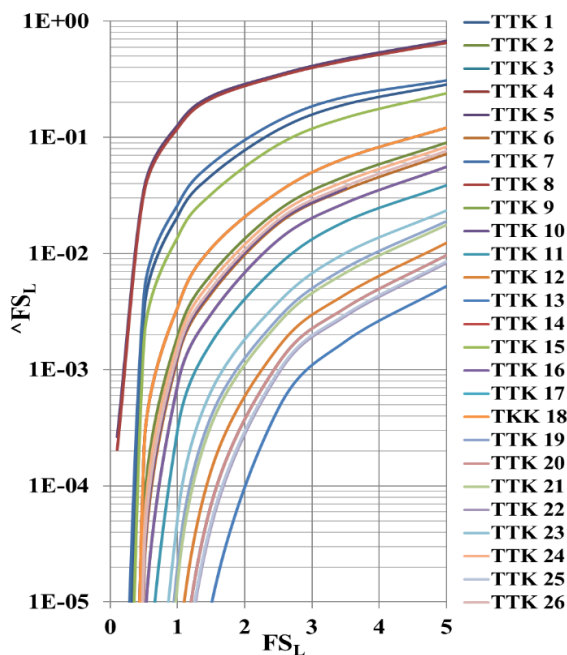
Analisis Kurva Bahaya Likuifaksi

Evaluasi bahaya likuifaksi dengan model probabilitas mengakomodir seluruh tingkat getaran gempa yang berpotensi menyebabkan terjadinya likuifaksi. Oleh karena itu, hasil evaluasi bahaya likuifaksi pada lokasi tinjauan dapat diinterpretasikan melalui suatu kurva yang dinamakan “Kurva Bahaya Likuifaksi”. Hasil evaluasi kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi di lokasi studi untuk kedalaman 1 m dan 2 m tersaji pada Gambar 5 dan Gambar 6. Kurva ini memodelkan secara langsung besarnya faktor keamanan terhadap likuifaksi untuk setiap periode ulang. Informasi yang tersaji dalam kurva ini dapat

dimanfaatkan secara praktis untuk perencanaan bangunan tahan gempa (Green dkk., 2019; Liu dkk., 2021).



Gambar 5. Kurva bahaya likuifaksi pada kedalaman tanah 1 m.



Gambar 6. Kurva bahaya likuifaksi pada kedalaman tanah 2 m.

Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa variasi nilai faktor keamanan (FS_L) yang cukup beragam terutama pada kedalaman 2 m. Indikasi ini terlihat dari interval kurva yang

terbentuk antar titik uji relatif cukup lebar. Hal ini sekaligus merepresentasikan bahwa tingkat kerentanan tanah di lokasi studi terhadap bahaya likuifaksi relatif bervariasi. Parameter tahanan tanah (q_c) yang dimiliki setiap titik uji sondir menunjukkan karakteristik yang cukup variatif. Gambaran evaluasi ini konsisten dengan hasil studi yang dilakukan oleh Mase (2020b). Selain itu, karakteristik nilai faktor keamanan yang ditunjukkan pada dua kurva ini adalah menurun seiring dengan meningkatnya periode ulang likuifaksi.

Analisis Probabilitas Bahaya Likuifaksi

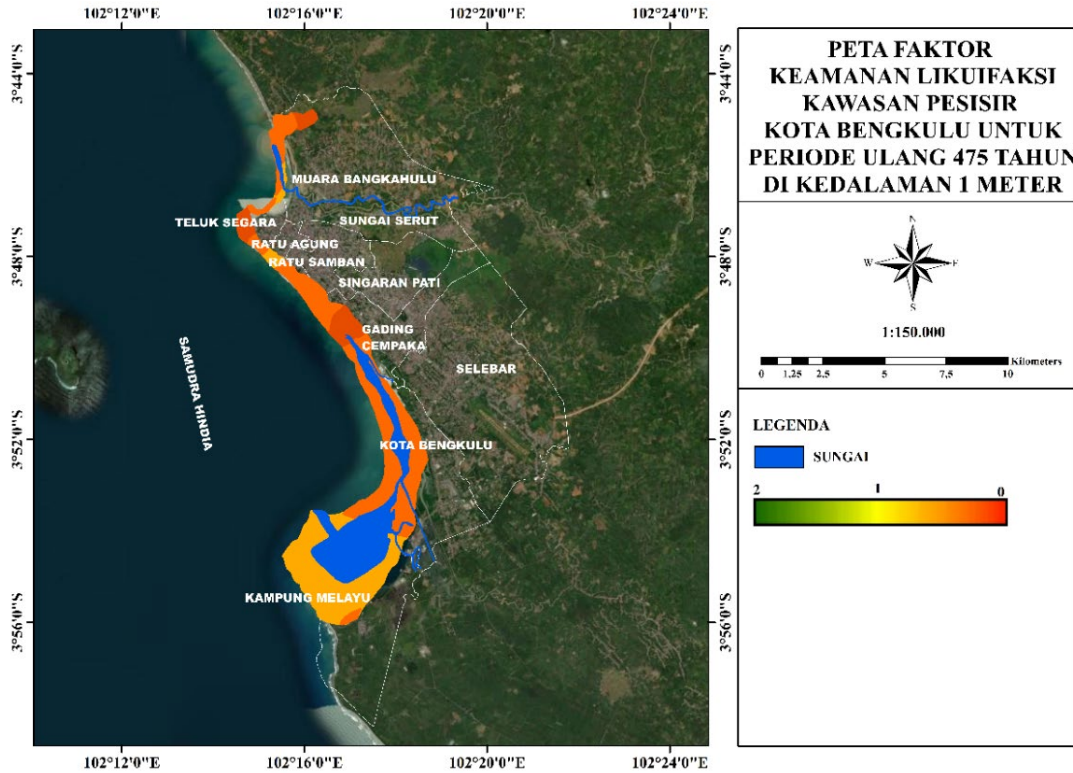
Analisis probabilitas likuifaksi di setiap variasi kedalaman tanah pada 26 titik uji sondir dilakukan menggunakan Persamaan (11). Secara umum, karakteristik nilai probabilitas kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi yang dihasilkan melalui Persamaan (11) menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan bertambahnya kedalaman lapisan tanah. Hal ini disebabkan karena terjadinya peningkatan nilai parameter tahanan tanah (q_c) terhadap kedalaman. Ghani dan Kumari (2021) menjelaskan bahwa karakteristik probabilitas likuifaksi menunjukkan perilaku menurun seiring dengan bertambahnya kekuatan geser tanah. Hasil analisis probabilitas dengan persamaan ini, secara eksplisit disajikan dalam bentuk model spasial peta probabilitas bahaya likuifaksi untuk suatu nilai periode ulang.

Model Spasial Peta Mirozonasi Bahaya Likuifaksi

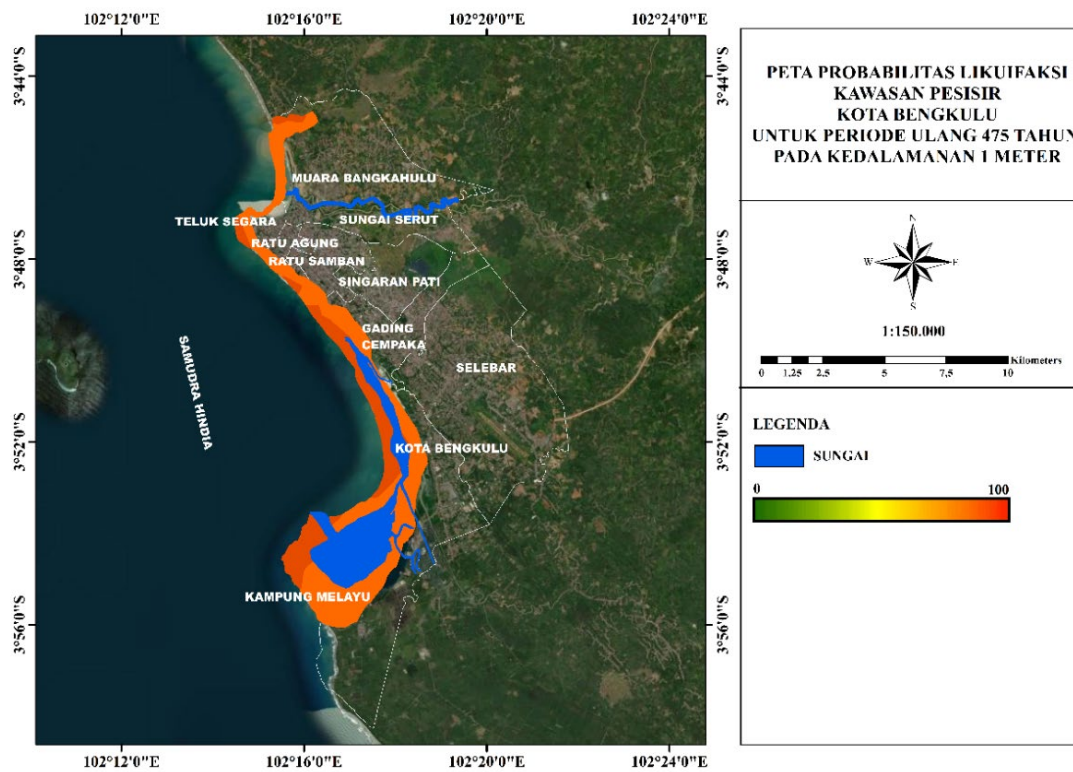
Hasil analisis evaluasi tingkat kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu juga disajikan dalam model spasial peta mikrozonasi bahaya likuifaksi. Pemodelan hasil analisis ini dilakukan agar lebih jelas tergambar pola sebaran nilai faktor keamanan dan probabilitas likuifaksi untuk satu nilai periode ulang di sepanjang area lokasi studi. Gambar 7 memperlihatkan sebaran nilai faktor keamanan likuifaksi (FS_L) pada kedalaman 1 m untuk periode ulang 475 tahun ($AFS_L=2E-04$). Model spasial ini menunjukkan bahwa faktor

keamanan pada kedalaman 1 m berada pada rentang nilai $FS_L < 1$. Besaran ini menunjukkan bahwa pada periode ulang 475 tahun hampir

seluruh kawasan pesisir Kota Bengkulu tidak aman terhadap bahaya likuifaksi.



Gambar 7. Peta mikrozonasi faktor keamanan kawasan pesisir Kota Bengkulu terhadap bahaya likuifaksi untuk periode ulang 475 tahun pada kedalaman 1 m.



Gambar 8. Peta mikrozonasi probabilitas kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu terhadap bahaya likuifaksi untuk periode ulang 475 tahun pada kedalaman 1 m.

Nilai probabilitas likuifaksi pada kedalaman 1 m untuk periode ulang 475 tahun tersaji pada Gambar 8. Hampir seluruh wilayah studi memiliki probabilitas likuifaksi hampir mendekati 100%. Besaran ini mengindikasikan bahwa sebagian besar wilayah studi berpotensi besar terjadi likuifaksi saat terjadi gempa. Hal ini konsisten dengan nilai faktor keamanan yang kurang dari 1, dimana kondisi tidak aman terhadap bahaya likuifaksi berpotensi terjadi di kedalaman ini.

Secara umum, gambaran karakteristik tingkat kerentanan tanah kawasan pesisir Kota Bengkulu menjelaskan bahwa untuk kepentingan perencanaan infrastruktur jalan dan bangunan rumah tahan bahaya likuifaksi, kedalaman pondasi harus dipertimbangkan agar lebih dalam 1 m walaupun daya dukung tanah pada kedalaman ini dianggap mampu memikul beban struktur di atasnya. Hal ini karena pada kedalaman 1 m, tingkat kerentanan tanah terhadap bahaya likuifaksi adalah besar yang ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan kurang dari 1 dengan probabilitas mencapai 100%.

KESIMPULAN

Studi evaluasi bahaya likuifaksi di kawasan pesisir Kota Bengkulu menghasilkan tingkat kerentanan yang berbeda seiring adanya perubahan kedalaman dan periode ulang likuifaksi. Perubahan kedalaman tanah dan periode ulang likuifaksi berturut-turut merepresentasikan variasi nilai parameter tahanan tanah dan parameter gempa yang berpotensi memicu terjadinya likuifaksi di kawasan ini. Peta mikrozonasi faktor keamanan dan probabilitas terhadap bahaya likuifaksi pada kedalaman 1 m untuk periode ulang 475 tahun menunjukkan bahwa kawasan pesisir Kota Bengkulu berada dalam kondisi tidak aman terhadap bahaya likuifaksi. Kondisi ini ditunjukkan oleh nilai faktor keamanan yang kurang dari satu dengan probabilitas hampir mencapai 100%. Karakteristik nilai tahanan tanah yang kurang dari 100 kg/cm² pada kedalaman ini, dianggap tidak mampu memikul beban gempa dengan percepatan

maksimum di permukaan yang mencapai 0,44 g. Struktur bangunan rumah dan infrastruktur jalan dengan kedalaman pondasi lebih dari 1 m perlu dipertimbangkan untuk mengurangi potensi kerusakan akibat bahaya likuifaksi. Selain itu, gambaran potensi likuifaksi di kawasan studi diharapkan dapat menjadi bahan rekomendasi bagi pemerintah daerah dalam usaha penataan wilayah di kawasan pesisir Kota Bengkulu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh civitas academica Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik UNIB dan Program Profesi Insinyur, Sekolah Pascasarjana UNAND atas dukungan dan kerjasama yang diberikan dalam penyusunan makalah ini.

REFERENSI

- Arndt, A. M. (2017). *Performance-Based Liquefaction Triggering Analyses with Two Liquefaction Models Using the Cone Penetration Test*. Brigham Young University ProQuest Dissertations Publishing, Provo, Utah.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
- Blonquist, J. L. (2020). *Development of a Simplified Performance-Based Procedure for Assessment of Liquefaction Triggering Using the Cone Penetration Test*. Brigham Young University ProQuest Dissertations Publishing, Provo, Utah.
- Boulanger, R.W. dan Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedure*. Report No. UCD/CGM.-14, 1, University of California, Davis.
- Farid, M., & Hadi, A. I. (2018). Measurement of Shear Strain in Map Liquefaction Area for Earthquake Mitigation in Bengkulu City. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(4), 1597.

- Ghani, S., Kumari, S. (2021). Probabilistic Study of Liquefaction Response of Fine-Grained Soil Using Multi-Linear Regression Model. *J. Inst. Eng. India Ser. A* **102**, 783–803.
- Green, R. A., & Bommer, J. J. (2019). What is the Smallest Earthquake Magnitude that Needs to be Considered in Assessing Liquefaction Hazard? *Earthquake Spectra*, *35*(3), 1441–1464.
- Green, R.A., Bommer, J.J., Rodriguez-Marek, A. (2019). Addressing Limitations in Existing ‘Simplified’ Liquefaction Triggering Evaluation Procedures: Application to Induced Seismicity in The Groningen Gas Field. *Bull Earthquake Eng* **17**, 4539–4557.
- Güler, E., Savaş, H., & Afacan, K. B. (2021). Effect of Permeability on Liquefaction Potential of Silty Sands. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*(14), 1410.
- Liu, C., Macedo, J., & Candia, G. (2021). Performance-Based Probabilistic Assessment of Liquefaction-Induced Building Settlements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *151*, 106955.
- 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.
- Mase, L. Z. (2018). Reliability Study of Spectral Acceleration Designs Against Earthquakes in Bengkulu City, Indonesia. *International Journal of Technology*, *9*(5), 910.
- Mase, L. Z. (2020a). Liquefaction Potential Analysis Based on Nonlinear Ground Response on the Coastline of Bengkulu City, Indonesia. *Makara Journal of Technology*, *24*(1), 34.
- Mase, L. Z. (2020b). Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, *38*(5), 5433–5455.
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021). Seismic Hazard Microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, *8*(1), 5.
- 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).
- Misliniyati, R., Mawardi, M., Besperi, B., Razali, M. R., & Muktadir, R. (2013). Pemetaan Potensi Likuifaksi Wilayah Pesisir Berdasarkan Data Cone Penetration Test di Kelurahan Lempuing, Kota Bengkulu. *Inersia: Jurnal Teknik Sipil*, *5*(2), 69-75.
- Misliniyati, R., Mase, L. Z., Syahbana, A. J., & Soebowo, E. (2018). Seismic Hazard Mitigation for Bengkulu Coastal Area Based on Site Class Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *212*, 012004.
- Nath, S. K., Srivastava, N., Ghatak, C., Adhikari, M. das, Ghosh, A., & Sinha Ray, S. P. (2018). Earthquake Induced Liquefaction Hazard, Probability and Risk Assessment in The City of Kolkata, India: Its Historical Perspective and Deterministic Scenario. *Journal of Seismology*, *22*(1), 35–68.
- Pramaditya, A., & Fathani, T. F. (2020). Physical Modelling of Earthquake-induced Liquefaction on Uniform Soil Deposit and Settlement of Earth Structures. *Journal of the Civil Engineering Forum*, *7*(1), 85-96.
- Pryambodo, D. G., & Sudirman, N. (2019). Identifikasi Likuifaksi di Kawasan Pesisir Kota Padang dengan Metoda Geolistrik 2d. *Jurnal Segara*, *15*(3).
- Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN). (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Kementerian

Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat,
Jakarta.

Zhao, Z., Duan, W., Cai, G., Wu, M., & Liu, S.
(2022). CPT-Based Fully Probabilistic
Seismic Liquefaction Potential

Assessment to Reduce Uncertainty:
Integrating XGBoost Algorithm with
Bayesian Theorem. *Computers and
Geotechnics*, 149, 104868.