

STUDI RESISTENSI TANAH BERDASARKAN VARIASI KEDALAMAN KECEPATAN GELOMBANG GESER (V_s) DI KECAMATAN SELEBAR, KOTA BENGKULU

Dedi Setiawan^{1*}, Lindung Zalbuin Mase¹, Fepy Supriani¹, Rena Misliniyati¹, Khairul Amri¹

¹ Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bengkulu

e-mail : ^(a)G1B021042.dedisetiawan@mhs.unib.ac.id, ^(b)lmase@unib.ac.id, ^(c)fsupriani@unib.ac.id, ^(d)rena_misliniyati@unib.ac.id, ^(e)kamri@unib.ac.id,

Abstrak. Kecamatan Selebar merupakan salah satu kecamatan di Kota Bengkulu yang memiliki beberapa infrastruktur vital. Kondisi geologi yang beragam dan aktivitas seismik yang masif menjadikan kawasan ini sebagai lokasi penting dalam studi geoteknik. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan antara kecepatan gelombang geser (V_s) terhadap resistensi tanah di Kecamatan Selebar berdasarkan parameter kecepatan gelombang geser rata-rata (V_s) pada kedalaman 10 hingga 50 m (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50}), kelas situs dan *Ground Amplification Factor* (GAF). Penelitian ini menggunakan data sekunder dari perekaman mikrotremor sebanyak 40 titik yang kemudian dianalisis dan divisualisasikan dalam bentuk peta sebaran dua dimensi berbasis *Geographic Information System* (GIS). Interpolasi spasial dilakukan menggunakan metode *Ordinary Kriging* dengan *Spherical Semivariogram Model* dan *Inverse Distance Weighting* (IDW) untuk memperoleh distribusi sebaran yang lebih akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50} di Kecamatan Selebar berkisar antara 100 hingga 1.100 m/s, dengan peningkatan kekakuan tanah seiring bertambahnya kedalaman. Kecamatan Selebar didominasi oleh kelas situs C, dengan beberapa zona B dan D, serta GAF antara 0.9 hingga 1,7. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai respons tanah dan dapat menjadi referensi dalam upaya mitigasi serta pertimbangan dalam perencanaan pembangunan infrastruktur tahan gempa di Kecamatan Selebar, Kota Bengkulu.

Kata Kunci: Amplifikasi Situs; Kecepatan Gelombang Geser; Kecamatan Selebar; Kelas Situs; Resistensi Tanah

Abstract. Selebar Subdistrict is one of the subdistricts in Bengkulu City that has several vital infrastructures. The diverse geological conditions and massive seismic activity make this area an important location for geotechnical studies. This research aims to explore the relationship between shear wave velocity (V_s) and soil resistance in Selebar Subdistrict based on the average shear wave velocity average shear wave velocity (V_s) at depths of 10 to 50 m (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , and V_{s50}), site class and *Ground Amplification Factor* (GAF). This study utilises secondary data from microtremor recordings at 40 points, which were then analysed and visualised in the form of a two-dimensional distribution map based on *Geographic Information System* (GIS). Spatial interpolation was performed using the *Ordinary Kriging* method with *Spherical Semivariogram Model* and *Inverse Distance Weighting* (IDW) to obtain a more accurate distribution. The results of the study show that the values of V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , and V_{s50} in Selebar Subdistrict range from 100 to 1,100 m/s, with an increase in soil stiffness with increasing depth. Selebar District is dominated by Site Class C, with some zones classified as B and D, and GAF values ranging from 0.9 to 1.7. This study is expected to provide insights into soil response and serve as a reference for mitigation efforts and considerations in the planning of earthquake-resistant infrastructure development in Selebar District, Bengkulu City.

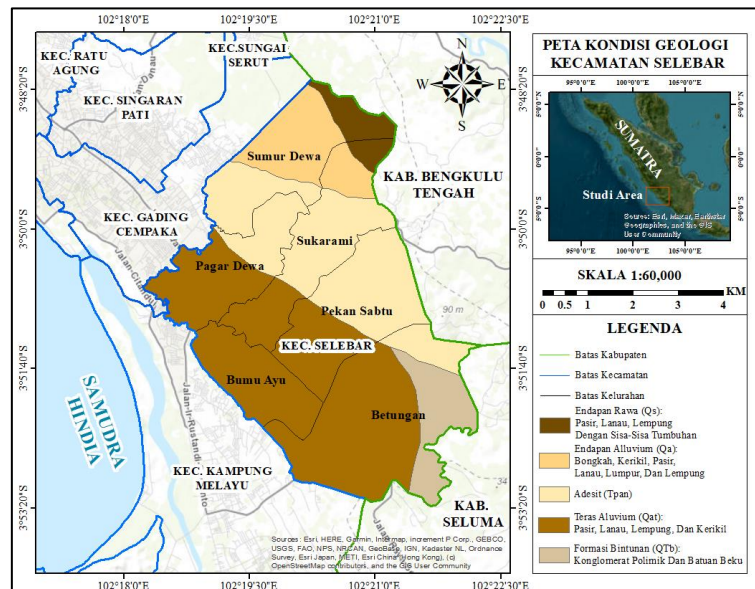
Keywords: Site Amplification; Shear Wave Velocity; Selebar sub-district; Site Class; Soil Resistance

PENDAHULUAN

Sebagai wilayah yang berdekatan dengan tiga zona tektonik utama, yaitu Sesar Sumatra, Sesar Mentawai, dan Zona Subduksi Sumatra, Kota Bengkulu dikategorikan sebagai wilayah dengan aktivitas seismik yang massif. Zona-zona ini membatasi Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia (Mase dkk., 2021). Mase (2017) melaporkan bahwa dalam dua dekade terakhir, Kota Bengkulu telah dilanda setidaknya dua gempa bumi besar. Gempa pertama, dengan kekuatan Mw 7,9 terjadi pada 4 Juni 2000 dan dikenal sebagai gempa Bengkulu–Enggano. Gempa kedua dengan magnitudo Mw 8,6 terjadi pada 12 September 2007, dikenal sebagai gempa Bengkulu–Mentawai (Mase, 2017). Menurut Zahara dkk. (2024), besarnya risiko seismik di Kota Bengkulu juga dipengaruhi oleh kondisi geologinya.

Secara umum, Kota Bengkulu terbentuk dari berbagai formasi geologi (Farid & Mase, 2020). Dari enam formasi geologi yang ada di Kota Bengkulu, lima diantaranya merupakan susunan yang membentuk daratan

Selebar. Gambar 1 menunjukkan bahwa daerah utara Selebar terdiri atas Formasi Endapan Rawa (Qs) dan Formasi Endapan Alluvium (Qa), sementara Formasi Andesit (Tpan) berada di sekitar pertengahan wilayah Selebar. Hampir setengah wilayah Selebar didominasi oleh Formasi Alluvium Teras (Qat), sedangkan di bagian tenggara terdapat Formasi Bintunan (Qtb). Menurut pendapat Hadi dkk. (2021), informasi mengenai susunan formasi batuan ini sangat penting dalam mengidentifikasi potensi kerusakan akibat aktivitas seismik.



Gambar 1. Peta Kondisi Geologi Kecamatan Selebar
(Sumber: Modifikasi dari Mase (2020))

Kecamatan Selebar merupakan kawasan yang memiliki sejumlah fasilitas penting seperti Bandara Fatmawati Soekarno, Universitas Islam Negeri Fatmawati Soekarno, pintu keluar masuk utama Jalan Tol Bengkulu-Taba Penanjung, serta berbagai bangunan perkantoran. Keberadaan infrastruktur vital ini menjadikan wilayah Selebar sebagai area yang sangat penting, baik dari segi mobilitas, pendidikan, maupun perekonomian.

Beberapa studi terdahulu mengenai kegempaan telah dilakukan oleh peneliti setempat. Mase (2018), melakukan studi yang membahas tentang keandalan desain percepatan spektral terhadap gempa bumi di Kota Bengkulu. Dalam penelitian Mase (2018), ditemukan bahwa selama perambatan gelombang geser, percepatan spektral yang dihasilkan lebih besar dari batas percepatan spektral yang telah ditentukan dalam perancangan. Mase (2020), membahas mengenai bahaya kerentanan seismik di Kota Bengkulu. Hasil studi menyimpulkan bahwa Kota Bengkulu memiliki potensi bahaya gempa bumi dan merekomendasikan untuk memperhitungkan faktor gempa bumi dalam perancangan struktur bangunan serta perencanaan tata ruang kota. Mase dkk (2021) menganalisis bahaya seismik dengan melakukan mikrozonasi di wilayah Kota Bengkulu dan menemukan bahwa formasi geologi didominasi oleh formasi Qs dan Qat serta kelas situs C dan D. Mase & Keawsawasvong (2022) juga menganalisis bahaya seismik di Kota Bengkulu dengan mempertimbangkan kemungkinan adanya Respons Spektral untuk tanah sedang dan kaku. Temuan menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Kota Bengkulu berpotensi mengalami gerakan tanah yang kuat.

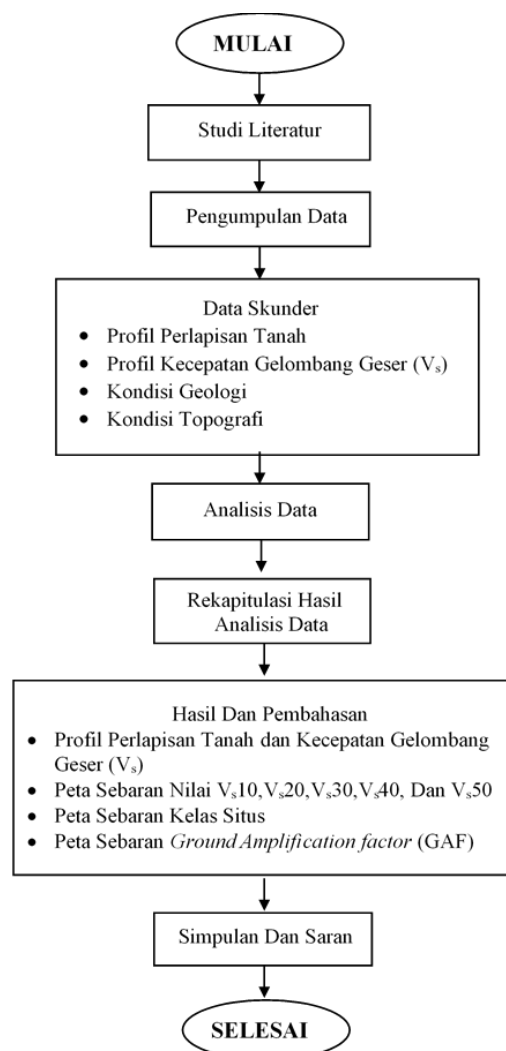
Meskipun berbagai studi telah membahas bahaya seismik secara luas di Kota Bengkulu, hingga saat ini belum banyak penelitian yang secara spesifik mengkaji Kecamatan Selebar. Selain itu, studi yang membahas mengenai resistensi tanah di lokasi setempat juga belum dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan mengeksplorasi hubungan antara kecepatan gelombang geser (V_s) terhadap resistensi tanah melalui peta dua dimensi berbasis *Geographic Information System* (GIS) berdasarkan parameter V_s pada kedalaman 10 hingga 50 meter (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50}), kelas situs, serta *Ground Amplification Factor* (GAF). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai respon tanah

lokal serta menjadi referensi mitigasi bencana dan pertimbangan dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa di Kecamatan Selebar.

METODOLOGI

Rancangan Penelitian

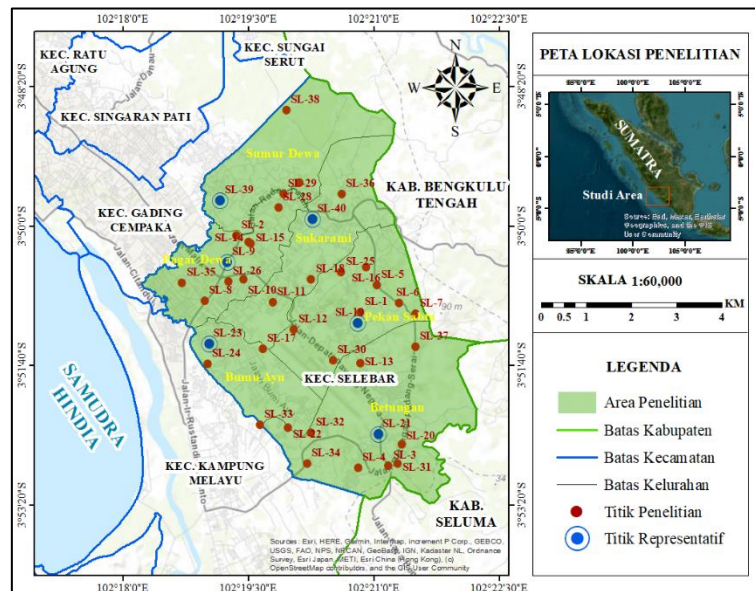
Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur mengenai riwayat gempa, kondisi tektonik, kondisi geologi Kecamatan Selebar dan dilanjutkan dengan studi mengenai dampak dan resiko gempa di Kecamatan Selebar. Pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder yang terdiri atas profil kecepatan gelombang geser (V_s), profil perlapisan tanah, kondisi geologi, dan kondisi topografi. Profil kecepatan gelombang geser (V_s) dan profil perlapisan tanah dikombinasikan untuk mendapatkan sebaran nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , dan V_{s50} . Nilai V_{s30} dianalisis untuk menentukan klasifikasi kelas situs dan *Ground Amplification Factor* (GAF). Penelitian akan menghasilkan peta sebaran nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , kelas situs, dan *Ground Amplification Factor* (GAF) di Kecamatan Selebar, Kota Bengkulu.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Lokasi Penelitian

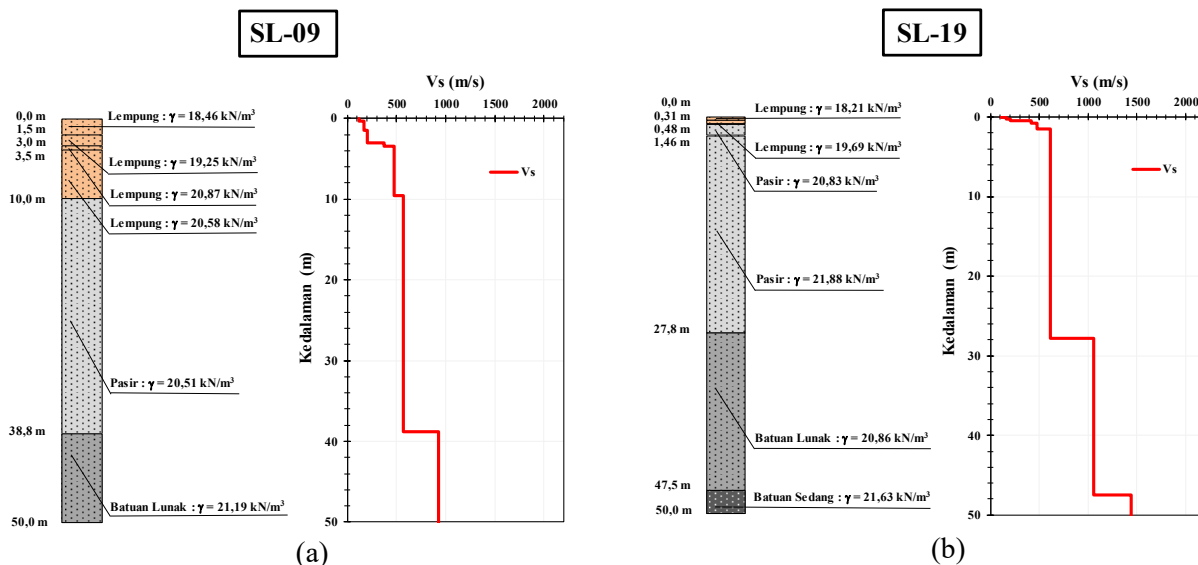
Studi dilakukan di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, seperti yang telah disajikan pada Gambar 3. Sebanyak 40 titik penelitian tersebar secara merata di seluruh wilayah Kecamatan Selebar. Sebaran dinilai dapat merepresentasikan kondisi seluruh Kecamatan Selebar untuk kepentingan studi resistensi tanah lokal. Lokasi Selebar dipilih mengingat kondisi geologi wilayah Selebar yang beragam dan juga terdapat beberapa infrastruktur penting.

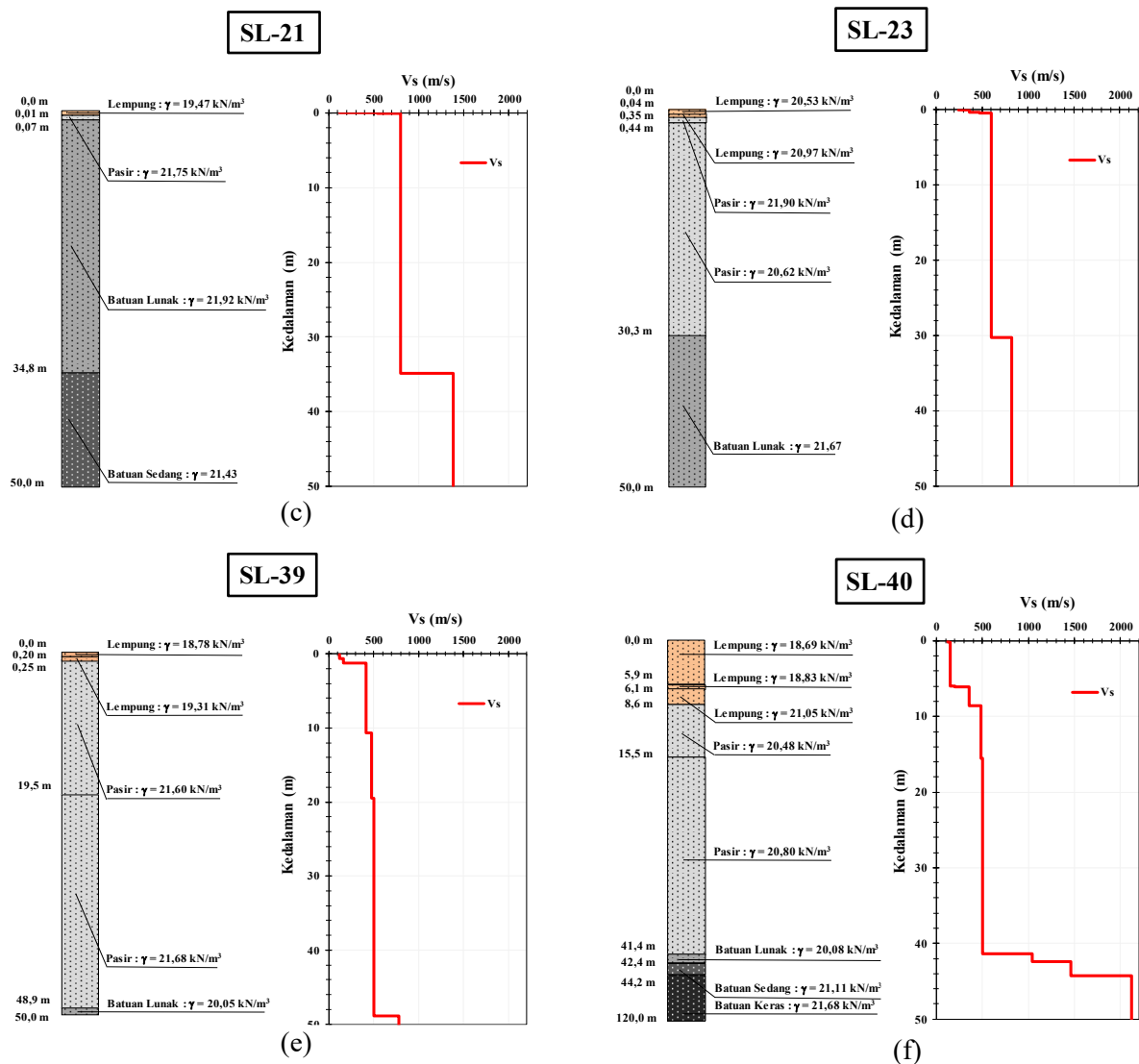


Gambar 3. Lokasi Penelitian

Teknik Pengumpulan dan Pengembangan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Laboratorium Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bengkulu, pada tahun 2017. Data yang tersedia merupakan hasil akhir (*post-processing*) dari pengukuran mikrotremor, berupa profil kecepatan gelombang geser (V_s) dan profil perlapisan tanah. Dari 40 titik penelitian, dipilih sebanyak 6 titik yang dianggap dapat mewakili seluruh wilayah dan merepresentasikan kondisi geologi setempat. Gambar 4 menyajikan profil kecepatan gelombang geser (V_s) beserta kondisi perlapisan tanah di lokasi representatif, yaitu SL-09, SL-19, SL-21, SL-23, SL-39 dan SL-40 yang masing-masing mewakili seluruh Kelurahan yang ada di Kecamatan Selebar, Kota Bengkulu.





Gambar 4. Profil Perlapisan Tanah Dan Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Pada Titik Representatif (a) Kel.Pagar Dewa (SL-09), (b) Kel.Pekan Sabtu (SL-19), (c) Kel.Betungan (SL-21), (d) Kel.Bumi Ayu (SL-23), (e) Kel.Sumur Dewa (SL-39), (f) Kel.Sukarami (SL-40)

Teknik Analisis Data

Profil kecepatan gelombang geser (V_s) dan kondisi perlapisan tanah diolah untuk mendapatkan rata-rata nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} dan V_{s50} . Nilai kecepatan gelombang geser (V_s) pada kedalaman yang ditinjau, dihitung berdasarkan pedoman *National Earthquake Hazards Reduction Program* NEHRP (2020) yang disajikan pada persamaan (1).

$$V_s d_i = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1)$$

Dengan:

V_s : Kecepatan gelombang geser

d_i : Tebal lapisan tanah hingga kedalaman yang ditinjau

V_{si} : Kecepatan gelombang geser setaip lapisan

Sifat tanah hingga kedalaman tertentu perlu diperhitungkan dalam analisis bahaya seismik (Chen dkk., 2021). Informasi V_{s30} diperlukan untuk menentukan klasifikasi kelas situs (Naji dkk., 2020, 2021; Tao & Rathje, 2020). NERPH (2020) mengeluarkan standar klasifikasi kelas situs yang ditampilkan pada tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Kelas Situs NEHRP

Kelas Situs	Deskripsi	Rata-Rata V_{s30} (m/s)
A	Batuan Keras	1500 <
B	Batuan Sedang	760 – 1500
C	Tanah keras, Sangat padat, dan Batuan Lunak	360 – 760
D	Tanah Sedang	180 – 360
E	Tanah Lunak	< 180

Tanah permukaan dapat diperkuat oleh tanah yang ada dibawahnya. Penguatan ini dipengaruhi oleh material tanah di bawah permukaan hingga kedalaman tertentu. Material ini bertindak sebagai medium yang memodifikasi perilaku gelombang saat melewati lapisan-lapisan tanah (Aldahri dkk., 2017). Beberapa ahli mengatakan bahwa, kelas situs dengan nilai V_{s30} yang lebih rendah umumnya menunjukkan amplifikasi yang lebih tinggi (Chaudhary, 2018; Parihar & Anbazhagan, 2020). Midorikawa dkk. (1994) menemukan hubungan empiris antara V_{s30} dan *Ground Amplification Factor* (GAF) melalui pendekatan yang tersaji pada persamaan (2).

$$\text{Log (GAF)} = 1,35 - 0,47\log V_{s30} \pm 0,18 \quad (2)$$

Dengan:

V_{s30} : Kecepatan gelombang geser rata-rata hingga kedalaman 30 m

GAF: *Ground Amplification Factor*

Setelah mendapatkan sebaran nilai V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} , V_{s50} , kelas situs, *Ground Amplification Factor* (GAF). Selanjutnya, dilakukan analisis melalui visualisasi dalam bentuk peta sebaran berbasis *Geographic Information System* (GIS) sebagai pendekatan dalam mengidentifikasi zona-zona yang beresiko terhadap aktivitas seismik.

Area yang tidak ditandai sebagai titik penelitian dianalisis menggunakan metode interpolasi. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan dua metode interpolasi spasial, yaitu *Inverse Distance Weighting* (IDW) dan *Ordinary Kriging* dengan *Model Semivariogram Spherical*. Pendekatan ini dipilih karena masing-masing metode memiliki karakteristik dan asumsi yang berbeda dalam memodelkan sebaran data spasial. Dengan membandingkan hasil dari kedua metode, pembaca dapat melihat sejauh mana perbedaan atau kesamaan hasil yang muncul akibat pendekatan interpolasi yang digunakan. Pendekatan ini dinilai penting agar pembaca memahami bahwa dalam analisis spasial, evaluasi hasil tidak hanya bergantung pada analisis kuantitatif dan objektif semata, tetapi juga melibatkan persepsi visual sebagai bagian dari proses interpretasi data spasial secara menyeluruh.

Inverse Distance Weighting (IDW) merupakan metode yang menggunakan skema pembobotan rata-rata spasial berdasarkan kebalikan jarak antara lokasi sampel dan lokasi nilai prediksi dalam interpolasi spasial. IDW digunakan untuk memperkirakan nilai pada lokasi yang tidak memiliki data dengan menghitung rata-rata tertimbang dari nilai-nilai di lokasi yang diketahui, di mana bobotnya berbanding terbalik dengan jarak (Wong, 2017). Semakin dekat titik data yang diketahui ke lokasi estimasi, semakin besar pengaruhnya terhadap nilai estimasi (Ballarin dkk., 2017). Berbeda dengan metode interpolasi tradisional yang berbasis model matematis, *Kriging* menggunakan teori variabel terregionalisasi yang memperlakukan data spasial sebagai variabel acak. *Kriging* mengandalkan variogram untuk menggambarkan variasi spasial dan hubungan antar titik data, sehingga dapat meminimalkan kesalahan prediksi. Nilai prediksi di suatu titik dihitung sebagai kombinasi berbobot dari nilai-nilai di titik-titik sekitar, di mana bobot ditentukan oleh kedekatan spasial dan korelasi antar data. (Cosentino dkk., 2023). *Kriging* Sangat populer untuk data spasial karena mempertimbangkan autokorelasi spasial dan biasanya menghasilkan prediksi paling akurat, terutama untuk data dibidang geologi. (Boumpoulis dkk., 2023; Sekulić dkk., 2020).

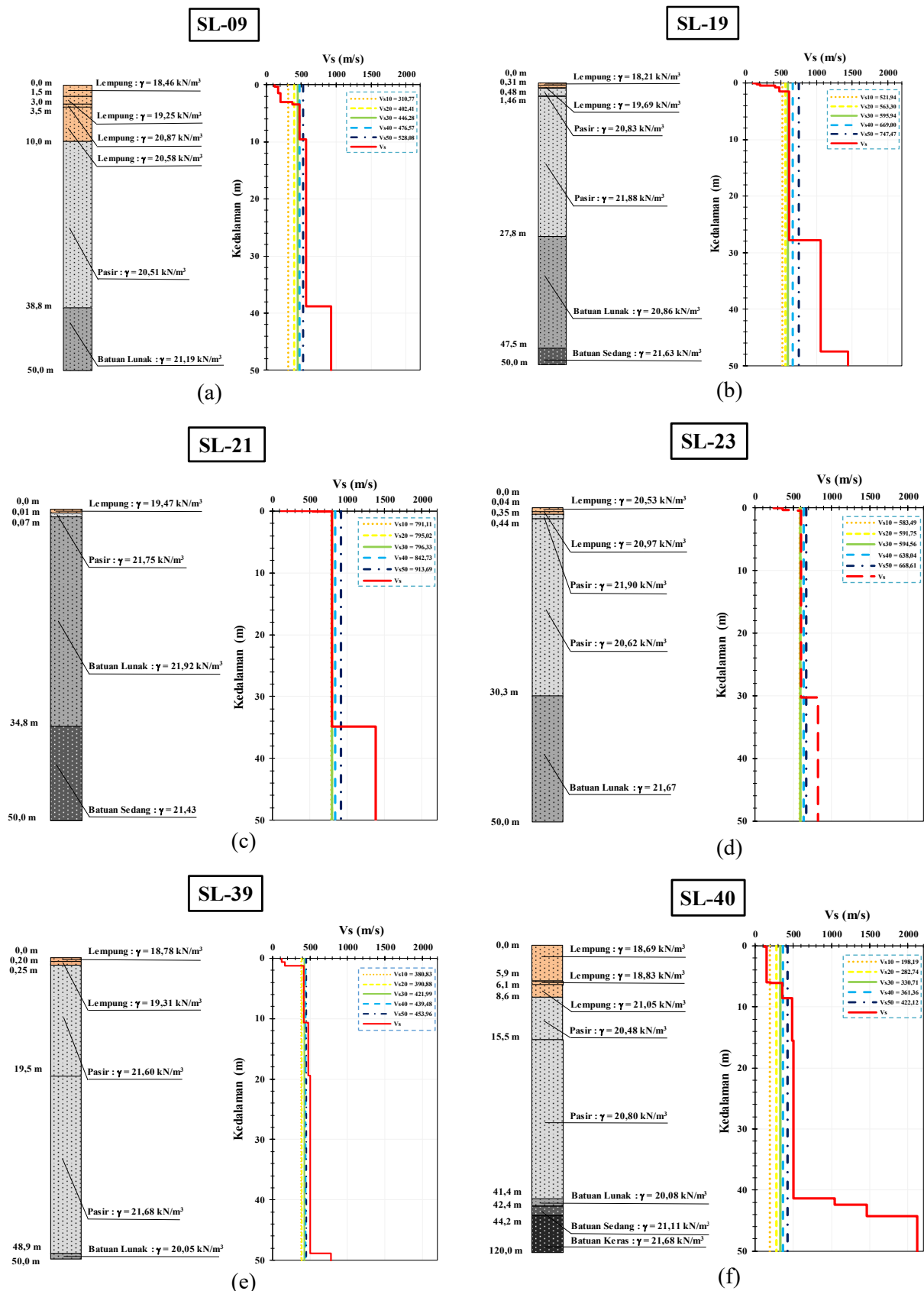
HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Perlapisan Tanah dan Kecepatan Gelombang Geser (V_s)

Gambar 5 menyajikan Profil perlapisan dan variasi kecepatan gelombang geser rata-rata (V_s) pada kedalaman 10 hingga 50 m (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} dan V_{s50}). Kedalaman 10 - 20 m dianggap merepresentasikan tanah dangkal, kedalaman 30 m dianggap merepresentasikan tanah sedang, dan kedalaman 40 dan 50 m dianggap merepresentasikan tanah dalam. Hasil analisis menunjukkan bahwa secara umum, wilayah Selebar tersusun atas tanah lempung dan pasir pada kedalaman dangkal, lapisan pasir dan batuan lunak dengan sedikit lempung dan batuan sedang pada kedalaman menengah, serta batuan lunak dan batuan sedang pada kategori tanah dalam.

Wilayah selatan Selebar, khususnya Kelurahan Betungan (SL-21), memiliki struktur geologi yang lebih kompak, dengan lapisan dangkal tersusun atas lempung dan pasir serta dominasi batuan lunak dengan V_{s10} sebesar 791,11 dan V_{s20} sebesar 795,02. Kedalaman menengah, lapisan penyusunnya didominasi oleh batuan lunak dengan V_{s30} sebesar 796,33, sementara itu pada kedalaman yang lebih dalam, hampir seluruhnya terdiri dari batuan sedang dengan sedikit batuan lunak dengan V_{s40} sebesar 842,73 dan V_{s50} sebesar 913,69. Sebaliknya, struktur lapisan di bagian utara Selebar, khususnya Kelurahan Sukarami (SL-40), kurang solid pada kedalaman dangkal dan menengah, tetapi menjadi lebih kompak pada kedalaman yang lebih dalam. Lapisan dangkal tersusun atas lempung dan pasir dengan V_{s10} sebesar 198,19 dan V_{s20} sebesar 282,74, sementara pada kedalaman menengah, struktur geologinya didominasi oleh lapisan pasir dengan V_{s30} sebesar 330,71. Kedalaman yang lebih dalam, lapisan tanah bersifat kompleks dengan dasar yang semakin solid, didominasi oleh pasir dengan sedikit batuan lunak, batuan sedang, serta batuan keras di bagian dasarnya dengan V_{s40} sebesar 361,36 dan V_{s50} sebesar 422,12. Terdapat hubungan erat antara resistensi tanah dan kecepatan gelombang geser (V_s), di mana nilai V_s bervariasi tergantung pada jenis dan kedalaman tanah. Tanah dengan nilai V_s yang lebih tinggi cenderung lebih kaku dan padat, sehingga memiliki resistensi lebih besar terhadap deformasi (Salsabili dkk., 2023).

Studi kecepatan gelombang geser pada berbagai kedalaman memberikan wawasan yang mendalam untuk memahami respons tanah lokal. Analisis kedalaman tanah dangkal (V_{s10} dan V_{s20}) berfokus pada kondisi yang mempengaruhi gerakan tanah permukaan, kecepatan gelombang geser pada kedalaman ini penting untuk memahami sifat dinamis tanah (Darvasi, 2021; Wang & Jiang, 2020). Analisis kedalaman tanah sedang (V_{s30}) digunakan sebagai proksi untuk mengklasifikasikan kelas situs dan GAF dalam persamaan prediksi gerakan tanah dan kode bangunan (Mase, 2020; Mase dkk., 2021). Analisis tanah pada tanah dalam (V_{s40} dan V_{s50}) berperan penting dalam mengungkap anisotropi serta variabilitas dalam profil V_s yang krusial untuk interpretasi geoteknik mendalam. Selain itu, pada kedalaman ini, pengaruh tekanan efektif terhadap V_s dapat dikaji lebih lanjut, hal tersebut memberikan wawasan lebih mendalam mengenai respons tanah terhadap beban seismik (Kishida & Tsai, 2021; Wang & Jiang, 2020). Kombinasi dari berbagai metode pengukuran dan analisis dapat meningkatkan akurasi prediksi dan pemahaman tentang perilaku tanah di berbagai kedalaman. Studi V_s pada kedalaman 10 hingga 50 m (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} dan V_{s50}) digunakan sebagai pendekatan untuk menilai resistensi tanah lokal, karena rentang kedalaman ini mencerminkan kombinasi karakteristik tanah dangkal hingga dalam. Dengan menganalisis V_s pada kedalaman 10 hingga 50 m, dapat diidentifikasi variasi kekakuan tanah yang memberikan gambaran secara general tentang resistensi tanah lokal.



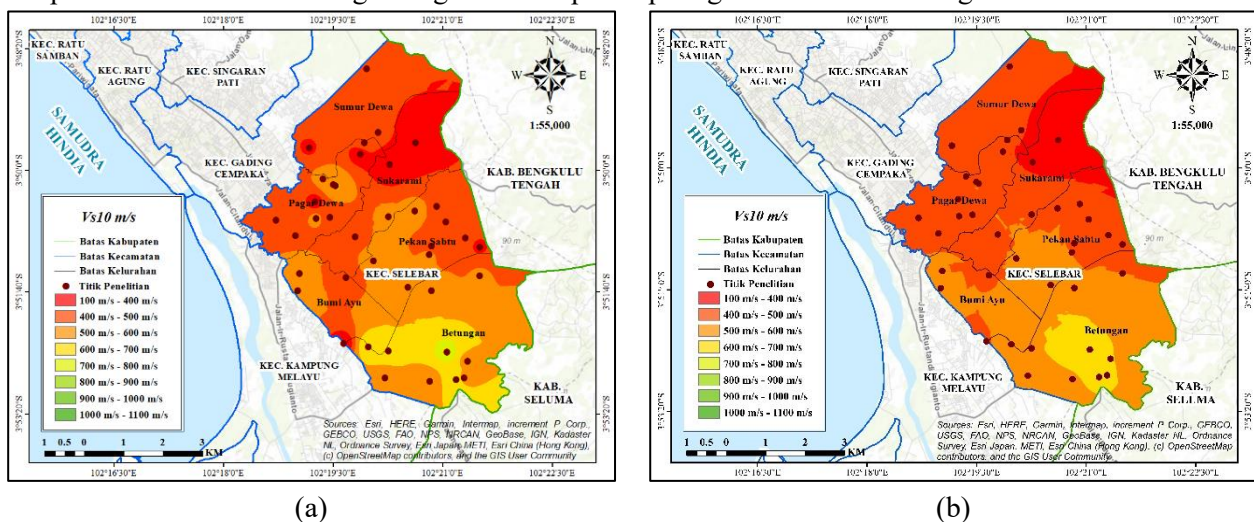
Gambar 5. Profil Perlapisan Tanah Dan Vs10, Vs20, Vs30, Vs40, Vs50 Pada Titik Representatif
 (a) Kel.Pagar Dewa (SL-09), (b) Kel.Pekan Sabtu (SL-19), (c) Kel.Betungan (SL-21), (d) Kel.Bumi Ayu (SL-23),
 (e) Kel.Sumur Dewa (SL-39), (d) Kel.Sukarami (SL-40)

Peta Sebaran Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Variasi Kedalaman 10 hingga 50 m (V_{s10} , V_{s20} , V_{s30} , V_{s40} dan V_{s50})

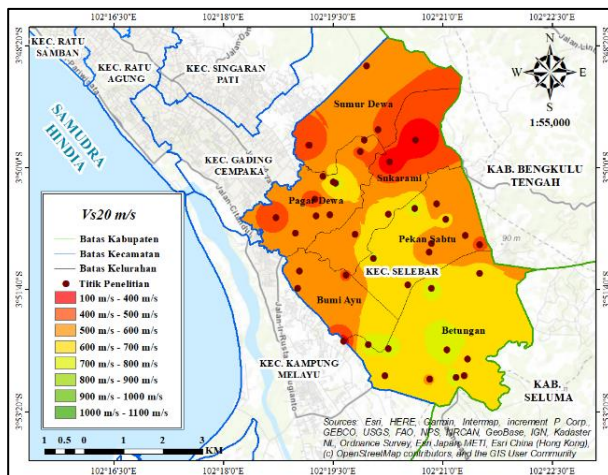
Studi ini bertujuan untuk melihat respon tanah terhadap kecepatan gelombang geser rata-rata (V_s) pada kedalaman 10, 20, 30, 40, dan 50 m yang diilustrasikan melalui peta sebaran dan ditunjukkan pada Gambar 6, 7, 8, 9, dan 10. Hasil analisis interpolasi spasial metode IDW dan *Kriging* menunjukkan tingkat kemiripan yang tinggi secara visual, tanpa perbedaan yang mencolok dalam pola distribusi data. Hal tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh kerapatan titik-titik penelitian, yang dapat meningkatkan akurasi interpolasi secara keseluruhan. Dalam konteks ini, meskipun IDW dikenal sebagai metode yang lebih sederhana dibandingkan *Kriging*, kepadatan data yang cukup tinggi memungkinkan metode ini untuk memberikan hasil yang tetap andal. Temuan ini menunjukkan bahwa keandalan suatu metode interpolasi tidak hanya bergantung pada kompleksitas algoritmanya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kualitas dan distribusi data yang digunakan.

Warna Merah pekat menunjukkan lapisan yang paling lemah, sedangkan tanah yang lebih kuat ditandai dengan warna hijau tua. Nilai V_{s10} berkisar antara 198,19 m/s hingga 791,11 m/s, V_{s20} berkisar antara 269,59 m/s hingga 795,02 m/s, V_{s30} berkisar antara 315,77 m/s hingga 906,86 m/s, V_{s40} berkisar antara 348,01 m/s hingga 1.000,55 m/s, dan V_{s50} berkisar antara 370,72 m/s hingga 1.086,81 m/s. Berdasarkan hasil analisis, terjadi perubahan pada nilai V_s yang cukup signifikan. Nilai V_s pada kedalaman yang lebih dangkal memiliki dominasi sebaran yang lebih rendah, sedangkan pada kedalaman yang lebih dalam, sebaran nilai V_s mengalami peningkatan. Perubahan tersebut mengindikasikan bahwa seiring bertambahnya kedalaman, tanah menjadi semakin keras dan padat. Menurut Kharebov dkk. (2019) tanah dengan nilai V_s yang tinggi umumnya mengalami penurunan intensitas seismik. Sebaliknya, tanah dengan nilai V_s yang rendah cenderung meningkatkan intensitas seismik, sehingga dapat meningkatkan risiko kerusakan selama gempa.

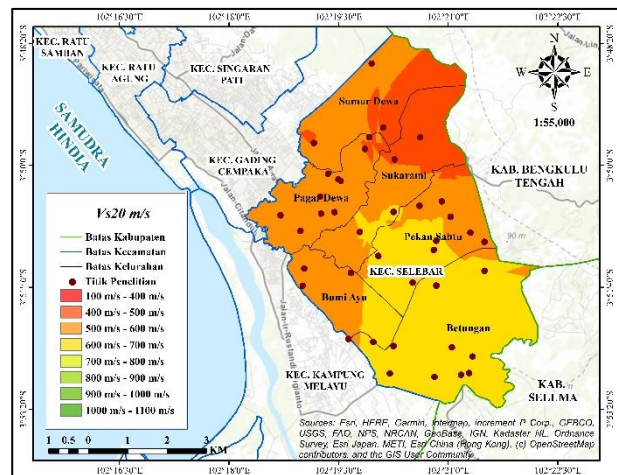
Dengan mempertimbangkan hal tersebut, zona yang teridentifikasi paling kritis berada pada daerah utara tepatnya di sebelah tenggara Selebar dengan konsistensi zona merah hingga orange yaitu dengan rentang nilai V_s berada pada 100 hingga 400 m/s. Sedangkan pada area selatan Selebar merupakan area teraman dengan nilai V_s yang relatif tinggi yaitu antara 600 hingga 1100 m/s. Kondisi ini kemungkinan juga dipengaruhi oleh struktur geologi di selatan Selebar, yang berada tepat di atas Formasi Bintunan (QTb) yang tersusun oleh konglomerat polimik dan batuan beku. Struktur tersebut meningkatkan tingkat resistensi tanah dibandingkan dengan bagian utara Selebar, yang didominasi oleh Formasi Teras Aluvium (Qat), Endapan Aluvium (Qa), Endapan Rawa (Qs), dan Andesit (Tpan). Hasil analisis sejalan dengan temuan Hadi dkk., (2021), berdasarkan analisis kecepatan gelombang seismik, Endapan Rawa (Qs), Teras Aluvium (Qat), dan Endapan Aluvium (Qa) merupakan formasi batuan dengan tingkat kekompakan paling rendah di Kota Bengkulu.



Gambar 6. Peta Sebaran V_{s10} (a) Metode IDW, (b) Metode *Kriging*

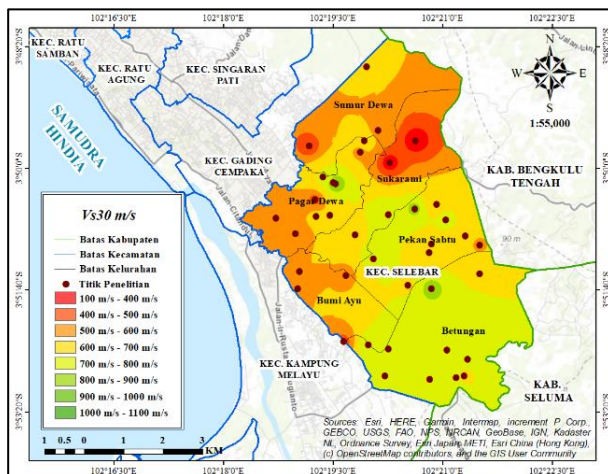


(a)

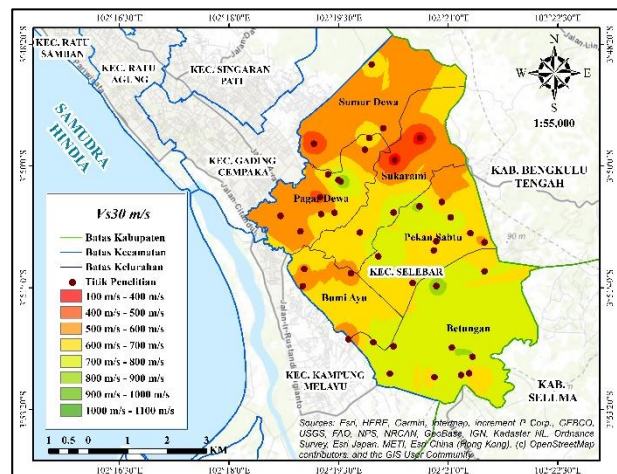


(b)

Gambar 7. Peta Sebaran V_{s20} (a) Metode IDW, (b) Metode Kriging

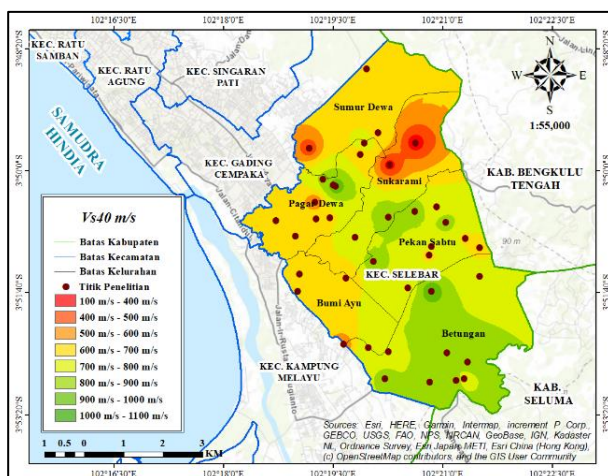


(a)

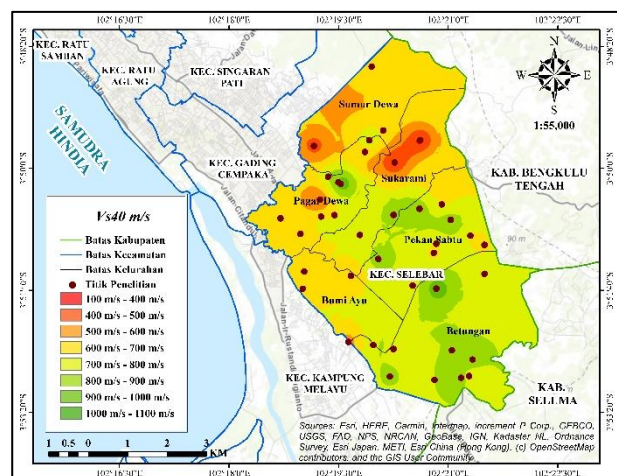


(b)

Gambar 8. Peta Sebaran V_{s30} (a) Metode IDW, (b) Metode Kriging

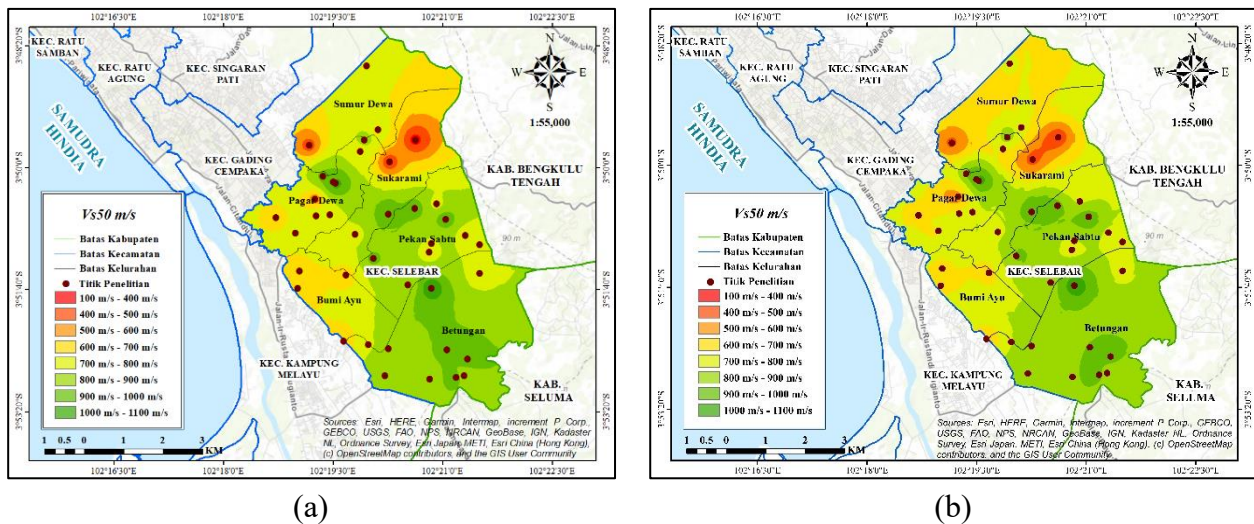


(a)



(b)

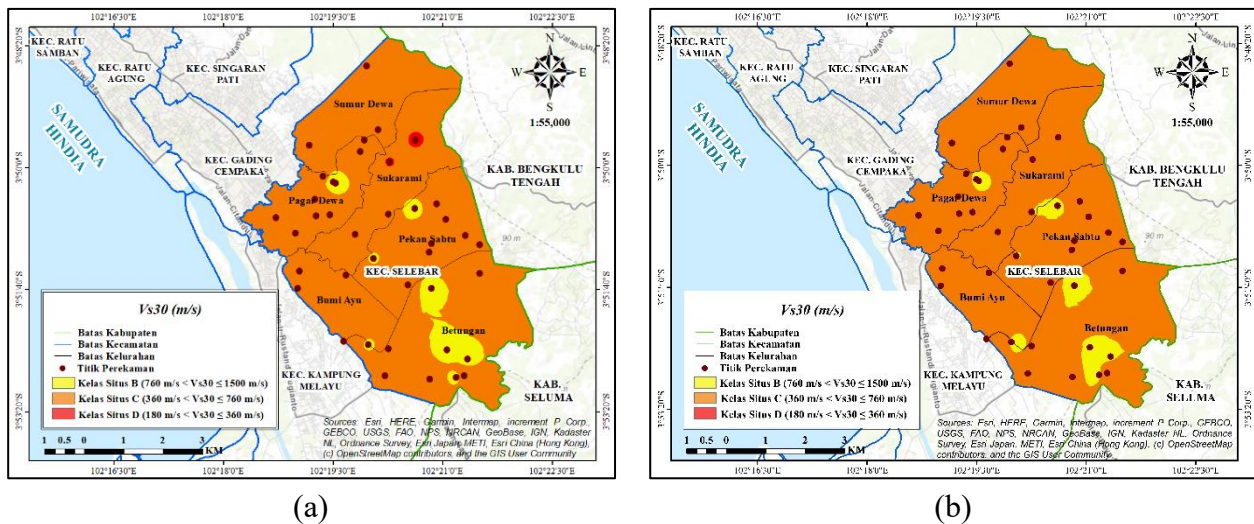
Gambar 9. Peta Sebaran V_{s40} (a) Metode IDW, (b) Metode Kriging



Peta Sebaran Kelas Situs

NEHRP merumuskan hubungan antara V_{s30} dengan klasifikasi kelas situs. Nilai V_{s30} yang lebih rendah mengindikasikan tingkat kerusakan yang lebih tinggi terhadap gempa bumi (Mase dkk., 2024; Sairam dkk., 2019). Berdasarkan sebaran nilai yang ditunjukkan pada Gambar 11, hasil analisis menunjukkan bahwa Kecamatan Selebar memiliki kelas situs yang bervariasi, yaitu B, C, dan D. Wilayah Tenggara Kecamatan Selebar, khususnya di Kelurahan Sukarami, memiliki beberapa zona dengan kelas situs D dan merupakan zona yang paling kritis di kecamatan Selebar. Analisis tersebut menunjukkan bahwa area ini memiliki kondisi tanah yang paling lemah sehingga berpotensi mengalami kerusakan yang lebih parah jika terjadi aktivitas seismik. Kelas situs B tersebar di area tengah Kelurahan Betungan serta beberapa bagian di Kelurahan Pekan Sabtu dan Pagar Dewa, sementara sebagian besar wilayah Kecamatan Selebar didominasi oleh kelas situs C.

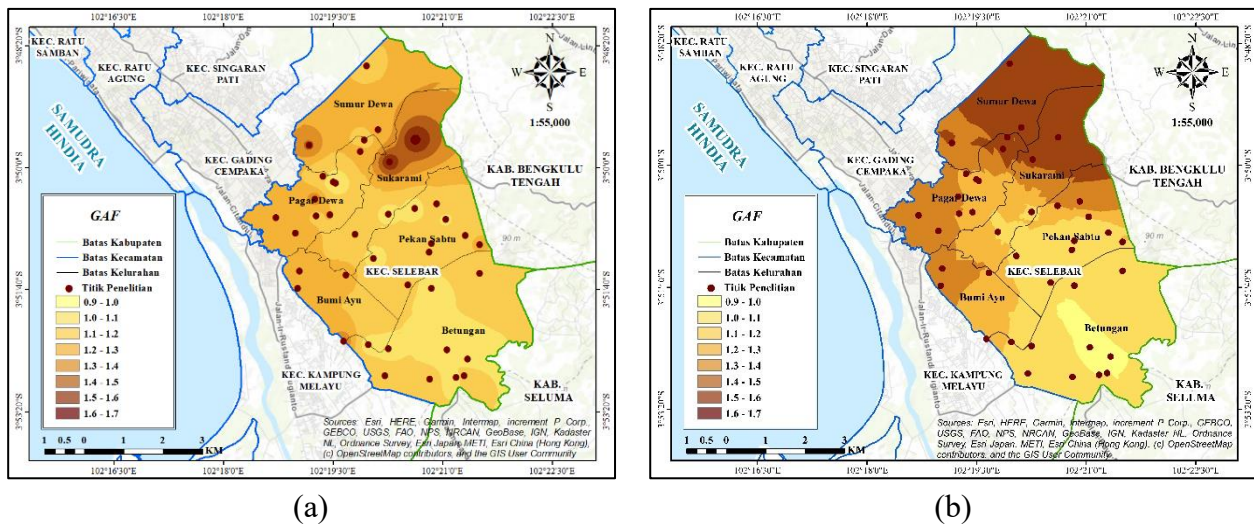
Salah satu daerah dengan kelas situs yang mirip adalah Ubhur, Utara Jeddah, Arab Saudi Barat. Diketahui bahwa wilayah ini terdiri atas 3 kategori kelas situs yang meliputi kelas situs B, C, dan D (Aldahri dkk., 2017). Aldahri dkk. 2017 mengemukakan bahwa wilayah dengan kedalaman batuan dasar yang dangkal, parameter V_{s30} tidak dapat diterapkan secara akurat, karena dikatakan bahwa metode perhitungannya mencakup kecepatan gelombang geser pada batuan dasar. Konsekuensinya, klasifikasi kelas situs yang dihasilkan cenderung lebih tinggi dari kondisi sebenarnya. Oleh sebab itu, dalam penelitian mereka, pemetaan kelas situs terbatas pada kategori C dan D. Namun, di Kecamatan Selebar, batuan dasarnya terletak lebih dari 30 m didalam tanah, sehingga parameter V_{s30} tetap dapat digunakan dalam menentukan kelas situs berdasarkan standar NEHRP.



Peta Sebaran *Ground Amplification Factor* (GAF)

Sebaran nilai GAF, ditampilkan pada Gambar 12. Hasil menunjukkan bahwa, Kecamatan Selebar memiliki sebaran GAF berkisar antara 0,9 hingga 1,7. Wilayah timur, utara terutama tenggara Kecamatan Selebar, merupakan zona paling kritis. Area tersebut memiliki faktor amplifikasi yang relatif besar diantara zona lainnya dengan rentang nilai 1,25 - 1,35. Membandingkan dengan sebaran klasifikasi kelas situs yang ada, temuan menunjukkan bahwa faktor amplifikasi berada pada kelas situs C dan D. Kelas situs dengan V_{s30} lebih rendah cenderung mengalami amplifikasi yang lebih besar (De La Torre dkk., 2024; Parihar & Anbazhagan, 2020). Kondisi tersebut mungkin juga dipengaruhi oleh struktur lapisan tanah yang ada dibawahnya. Walaupun kondisi geologinya termasuk ke dalam formasi batuan Andesit (Tpan) yang secara umum diketahui memiliki struktur yang relatif kompak Hadi dkk., (2021). Lapisan tanah menunjukkan bahwa pada kedalaman dangkal sampai dengan sedang yaitu kedalaman 10 hingga 30 m terdiri dari tanah lempung dan berpasir, sedangkan batuan lunak, sedang, dan keras berada pada kedalaman lebih dari 40 m. Kondisi ini dapat berpengaruh nilai GAF, karena dalam pendekatannya GAF berhubungan dengan V_{s30} , seperti pada persamaan (2).

Faktor penyebab terjadinya amplifikasi dapat bervariasi. Amplifikasi dapat dipengaruhi oleh topografi, geologi dan lapisan tanah. Studi di Qiaozhuang, Sichuan, menunjukkan bahwa kombinasi topografi dan geologi dapat menyebabkan amplifikasi yang kuat dan bervariasi (Luo dkk., 2020). Di Italia, amplifikasi situs juga dipengaruhi oleh kondisi geologi seperti cekungan sedimen dan ketidakberaturan topografi (Pischiutta dkk., 2022). Di dekat Nankai Trough, lapisan sedimen tebal dapat menyebabkan amplifikasi besar pada tremor dangkal, terutama ketika terdapat lapisan sedimen dengan kecepatan gelombang rendah (Takemura dkk., 2024).



Gambar 12. Peta Sebaran *Ground Amplification Factor* (GAF) (a) Metode IDW, (b) Metode Kriging

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Melalui analisis dan pembahasan, penelitian ini berhasil menghasilkan profil perlapisan tanah serta distribusi nilai V_s pada kedalaman 10, 20, 30, 40, dan 50 meter, beserta peta sebaran kelas situs dan nilai GAF di Kecamatan Selebar. Hasil menunjukkan bahwa kekakuan tanah di Kecamatan Selebar meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Secara umum, Kecamatan Selebar didominasi oleh kelas situs C dengan tingkat resistensi tanah yang relatif rendah. Kecamatan Selebar juga memiliki sebaran GAF yang relatif rendah, namun tetap berpotensi memperbesar gelombang seismik yang dapat meningkatkan terjadinya kerusakan pada struktur di atasnya.

Daerah dengan resistensi tanah paling lemah terletak di bagian tenggara Kecamatan Selebar, khususnya bagian utara Kelurahan Sukarami. Sebaliknya, daerah dengan tingkat resistensi tanah paling kuat terletak di bagian timur Kecamatan Selebar, tepatnya di area tengah Kelurahan Betungan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai respons tanah lokal dan dapat menjadi referensi dalam upaya mitigasi serta pertimbangan dalam perencanaan infrastruktur tahan gempa di Kecamatan Selebar, Kota Bengkulu.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Geoteknik Teknik Sipil Universitas Bengkulu, *Mase's Geotechnical Research Laboratory* atas dukungan dan bantuannya dalam proses penyediaan dan pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Aldahri, M., mogren, S., Abdelrahman, K., Zahran, H., El Hady, S., & El-Hadidy, M. (2017). Surface Soil Assessment in the Ubhur Area, North of Jeddah, Western Saudi Arabia, Using a Multichannel Analysis of Surface Waves Method. *Journal of the Geological Society of India*, 89(4), 435–443. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0626-7>
- Ballarin, F., D'Amario, A., Perotto, S., & Rozza, G. (2017). *A POD-selective inverse distance weighting method for fast parametrized shape morphing*. <https://doi.org/10.1002/nme.5982>
- Boumpoulis, V., Michalopoulou, M., & Depountis, N. (2023). Comparison between different spatial interpolation methods for the development of sediment distribution maps in coastal areas. *Earth Science Informatics*, 16(3), 2069–2087. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01017-4>
- Building Seismic Safety Council (BSSC). (2020). *NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (FEMA P-2082-1): Volume I: Part 1*

Provisions and Part 2 Commentary. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-10/fema_2020-nehrp-provisions_part-1-and-part-2.pdf

- Bustari, A. A., & Wibowo, N. B. (2023). Pemetaan sebaran nilai Vs30, faktor amplifikasi tanah, dan peak ground acceleration wilayah Bantul timur. *Cakrawala Jurnal Ilmiah Bidang Sains*, 1(2). <https://doi.org/10.28989/cakrawala.v1i2.1436>
- Chaudhary, M. T. A. (2018). A study on sensitivity of seismic site amplification factors to site conditions for bridges. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 51(4), 197–211. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.51.4.197-211>
- Cosentino, N. J., Opazo, N. E., Lambert, F., Osses, A., & van 't Wout, E. (2023). Global-Krigger: A Global Kriging Interpolation Toolbox With Paleoclimatology Examples. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 24(6). <https://doi.org/10.1029/2022GC010821>
- Darvasi, Y. (2021). Shear-wave velocity measurements and their uncertainties at six industrial sites. *Earthquake Spectra*, 37(3), 2223–2246. <https://doi.org/10.1177/8755293020988029>
- De La Torre, C. A., Bradley, B. A., Kuncar, F., Lee, R. L., Wotherspoon, L. M., & Kaiser, A. E. (2024). Combining observed linear basin amplification factors with 1D nonlinear site-response analyses to predict site response for strong ground motions: Application to Wellington, New Zealand. *Earthquake Spectra*, 40(1), 143–173. <https://doi.org/10.1177/87552930231209726>
- Farid, M., & Mase, L. Z. (2020). Implementation Of Seismic Hazard Mitigation On The Basis Of Ground Shear Strain Indicator For Spatial Plan Of Bengkulu City, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 18(69), 199–207. <https://doi.org/10.21660/2020.69.24759>
- Hadi, A. I., Farid, M., Refrizon, R., Harlianto, B., Hudayat, N., & Krisbudianto, M. (2021). Pemetaan Potensi Kerentanan Gempabumi Pada Kota Bengkulu Menggunakan Data Mikrotremor dan Metode Analytical Hierarchy Process. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 18(2), 105. <https://doi.org/10.20527/flux.v18i2.9479>
- Hadi, A. I., Refrizon, R., Halaudhin, H., Lidiawati, L., & Edo, P. (2021). Interpretasi Tingkat Kekerasan Batuan Bawah Permukaan di Daerah Rawan Gempa Bumi Kota Bengkulu. *Indonesian Journal Of Applied Physics*, 11(1), 11. <https://doi.org/10.13057/ijap.v11i1.46525>
- Jahanandish, M., Zafarani, H., & Shafiee, A. H. (2017). Implementation of the Square-Root-Impedance Method to Estimate Site Amplification in Iran Using Random Profile Generation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(1), 456–467. <https://doi.org/10.1785/0120160119>
- Kharebov, C. S., Zaalishvili, V. B., Zaks, T. V., Baskaev, A. N., Archireeva, I. G., Gogichev, R. R., Maysuradze, M. V., & Chitishvili, M. I. (2019). Influence of Soils on Impact Parameters of Seismic Effect. *Proceedings of the VIII Science and Technology Conference "Contemporary Issues of Geology, Geophysics and Geo-ecology of the North Caucasus" (CIGGG 2018)*. <https://doi.org/10.2991/ciggg-18.2019.31>
- Kishida, T., & Tsai, C.-C. (2021). Wave velocities depending on shear strain, directionality, and excess pore water pressure from wildlife liquefaction array. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(6), 2371–2388. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01074-4>
- Luo, Y., Fan, X., Huang, R., Wang, Y., Yunus, A. P., & Havenith, H. B. (2020). Topographic and near-surface stratigraphic amplification of the seismic response of a mountain slope revealed by field monitoring and numerical simulations. *Engineering Geology*, 271, 105607. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105607>
- 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). Reliability Study of Spectral Acceleration Designs Against Earthquakes in Bengkulu City, Indonesia. *International Journal of Technology*, 9(5), 910. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i5.621>
- Mase, L. Z. (2020). Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 5433–5455. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>

- 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). <https://doi.org/10.2174/18741495-v16-e221021-2022-49>
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021). Seismic hazard microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>
- Mase, L. Z., Wahyuni, M. S., Hardiansyah, & Syahbana, A. J. (2024). Prediction of Damage Intensity Level Distribution in Bengkulu City, During the Mw 8.6 Bengkulu-Mentawai Earthquake in 2007, Indonesia. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(2), 769–793. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00306-1>
- Midorikawa S., Matsuoka, M., & Sakugawa, K. (1994). Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake. *Proceedings of the 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, E-085 – E-090.
- Naji, D. M., Akin, M. K., & Cabalar, A. F. (2020). A Comparative Study on the Vs30 and N30 Based Seismic Site Classification in Kahramanmaras, Turkey. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1). <https://doi.org/10.1155/2020/8862827>
- Naji, D. M., Akin, M. K., & Cabalar, A. F. (2021). Evaluation of seismic site classification for Kahramanmaras City, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 97. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09396-x>
- Parihar, A., & Anbazhagan, P. (2020). Site Response Study and Amplification Factor for Shallow Bedrock Sites. *Indian Geotechnical Journal*, 50(5), 726–738. <https://doi.org/10.1007/s40098-020-00410-w>
- Pischiutta, M., Akinci, A., Felicetta, C., Pacor, F., & Morasca, P. (2022). Testing Site Amplification Curves in Hybrid Broadband Ground Motion Simulations of M6.0, 24 August 2016 Amatrice Earthquake, Italy. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.886606>
- Sairam, B., Singh, A. P., Patel, V., Chopra, S., & Kumar, M. R. (2019). Vs30 mapping and site characterization in the seismically active intraplate region of Western India: implications for risk mitigation. *Near Surface Geophysics*, 17(5), 533–546. <https://doi.org/10.1002/nsg.12066>
- Salsabili, M., Saeidi, A., Rouleau, A., & Nastev, M. (2023). Probabilistic approach for seismic microzonation integrating 3D geological and geotechnical uncertainty. *Earthquake Spectra*, 39(1), 310–334. <https://doi.org/10.1177/87552930221132576>
- Sekulić, A., Kilibarda, M., Heuvelink, G. B. M., Nikolić, M., & Bajat, B. (2020). Random Forest Spatial Interpolation. *Remote Sensing*, 12(10), 1687. <https://doi.org/10.3390/rs12101687>
- Takemura, S., Emoto, K., & Yabe, S. (2024). Revisiting Seismic Energy of Shallow Tremors: Amplifications Due To Site and Propagation Path Effects Near the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(6). <https://doi.org/10.1029/2024JB029168>
- Tao, Y., & Rathje, E. (2020). Taxonomy for evaluating the site-specific applicability of one-dimensional ground response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128, 105865. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105865>
- Wang, H.-Y., & Jiang, W.-P. (2020). In Situ Shear-Wave Velocity Assessment at the Delaney Park Downhole Array, Anchorage, Alaska. *Seismological Research Letters*, 91(6), 3381–3390. <https://doi.org/10.1785/0220200097>
- Wills, C. J., Gutierrez, C. I., Perez, F. G., & Brnum, D. M. (2015). A Next Generation Vs30 Map for California Based on Geology and Topography. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(6), 3083–3091. <https://doi.org/10.1785/0120150105>
- Wong, D. W. S. (2017). Interpolation: Inverse-Distance Weighting. Dalam *International Encyclopedia of Geography* (hlm. 1–7). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0066>
- Zahara, A., Zalbuin Mase, L., Supriani, F., Misliniyati, R., & Amri, K. (2024). Studi Perbandingan Linier Ekuivalen dan Nonlinier pada Respon Seismik di Daerah Pesisir. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 160–176. <https://doi.org/10.31849/siklus.v10i2.20670>