

Kajian struktur bawah tanah berdasarkan parameter mikroseismik di Kota Lama Semarang

Ilqia Rahma*, Desi Mustami', Limayukha, Muthiah Afifah, Wahyu Humam Muttaqin, dan Supriyadi

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang
Sekaran, Kec. Gn. Pati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229

Email: [*ilqiarahma@gmail.com](mailto:ilqiarahma@gmail.com)

Abstrak: Salah satu objek wisata sejarah yang terkenal di Semarang adalah Kota Lama. Kota Lama Semarang memiliki detail luas kawasan sebesar +/- 31,24 Hektar dan berlokasi di Desa Bandarharjo, Semarang Utara. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian struktur bawah tanah berdasarkan parameter mikroseismik dengan menggunakan alat Seismometer M. A. E tipe S3S yang dilengkapi dengan Vibralog dan kabel fiber optik. Analisis mikrotremor dapat dilakukan dengan metode HVSR. Dalam menganalisis data mikrotremor dengan metode HVSR dibantu dengan menggunakan *software* Geopsy. Hasil penelitian memperlihatkan rentang nilai frekuensi natural yang relatif bervariasi dan berada pada kisaran antara 5.5-18 Hz. Nilai amplifikasi dalam kisaran antara 0,2-0,86 dengan besar distribusi faktor amplifikasi dominan rendah. Nilai indeks kerentanan seismik di daerah tersebut tergolong kategori rendah dengan rentang 0,004-0,058 s²/cm. Daerah kota lama memiliki nilai PGA berkisar 38-71 gal dengan tingkat resiko rendah hingga sedang. Rentang nilai *Ground Shear Strain* pada Kota Lama Semarang berkisar antara 0,0005-0,0018 termasuk dalam kategori sifat dinamika tanah berupa elastoplastisitas.

Kata kunci: mikroseismik, frekuensi natural, Kota Lama

Study of underground structures based on microseismic parameters in Kota Lama Semarang

Abstract: One of the famous historical attractions in Semarang is Kota Lama. Kota Lama is +/- 31.24 hectares and located in Bandarharjo Village, North Semarang. This study was aimed to determine the underground structures based on microseismic parameters using an M.A.E Seismometer type S3S equipped with Vibralog and fiber optic cables. Microtremor analysis was conducted using the HVSR method. In analyzing the microtremor data with the HVSR method, Geopsy software was used. The results show that the range of dominant frequency values is relatively varied and is in the range between 5.5-18 Hz. The amplification value is in the range between 0.2 and 0.86 with a low dominant amplification factor distribution. The value of the seismic vulnerability index in the area is classified as low category with a range of 0.004-0.058 s²/cm. Kota Lama has a PGA value ranging from 38-71 gal with a low to moderate risk level. The range of Ground Shear Strain values in Kota Lama Semarang ranges from 0.0005-0.0018 which is included in the category of soil dynamics in the form of elastoplasticity

Keywords: microseismic, natural frequency, Old Town

PENDAHULUAN

Geofisika merupakan bagian ilmu kebumihan yang mempelajari bumi dengan menggunakan kaidah atau prinsip fisika. Studi geofisika yaitu pengumpulan data permukaan dari parameter fisik batuan bumi, diperlukan untuk menentukan kondisi bawah permukaan bumi. Pengumpulan data tersebut dapat menginterpretasikan sifat serta kondisi bawah permukaan bumi baik secara vertikal ataupun horizontal. Di sisi lain lapisan batuan dari kulit bumi (atau litosfer) dan perkembangan historisnya juga dibahas dalam geologi (Bahri & Madlazim, 2012).

Kota Lama Semarang adalah objek wisata sejarah yang berlokasi di Desa Bandarharjo Semarang Utara dan memiliki kawasan seluas kurang lebih 31,24 Hektar. Daerah ini berbatasan langsung dengan Jalan Ronggowarsito (Timur), Kali Semarang (Barat), Jalan Stasiun Tawang (Utara), dan Jalan Agus Salim (Selatan). Kawasan Kota Lama dipadati oleh bangunan dan kawasan ini sempat dikelilingi oleh benteng berbentuk segi lima di masa sebelum tahun 1824. Struktur Kota Lama memiliki pola yang unik dimana polanya terbentuk dari kombinasi antara Kota Barat (Belanda) dan penduduk setempat (Dewantara & Astuti, 2017).

Di kawasan Kota Lama Semarang terdapat beberapa peninggalan sejarah salah satunya yaitu Gereja Blenduk yang merupakan gereja tua peninggalan zaman Portugis dan Belanda (Puspitasari & Ramli, 2018). Kota Lama mengalami perkembangan dan tentunya diimbangi dengan munculnya permasalahan yang lebih kompleks (Ikhsyan, Muryani, & Rintayati, 2017). Penurunan muka tanah merupakan salah satu permasalahan yang terjadi di daerah ini dengan rerata 3 cm/tahun. Penurunan yang cukup tajam terjadi di daerah Stasiun Poncol hingga Stasiun Tawang dan juga di sekitar Pelabuhan Tanjung Mas (Wardhana, Harjono, & Sudaryanto, 2014) dengan laju penurunan berkisar 2,07-17,04 cm/tahun dari tahun 2013 hingga 2017 (Prasetya, Yuwono, & Awaluddin, 2017). Adanya peristiwa penurunan permukaan tanah di daerah ini menjadi faktor seringnya dilakukan penelitian geologi dan teknik untuk mengidentifikasi penyebabnya. Kondisi geologi Kota Lama Semarang adalah memiliki jenis tanah berupa aluvial. Beberapa penelitian menunjukkan adanya korelasi antara endapan aluvial muda, pembebanan kota, dan pengambilan air tanah. Umumnya, dari hasil pemodelan 2D didapatkan penyebab penurunan muka tanah di daerah tersebut disebabkan oleh pembebanan dari permukaan (Sarah, Soebowo, Mulyono, Nugroho, & Satriyo, 2013). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ramadhan *et al.*, (2021) diperoleh hasil bahwa secara vertikal litologi daerah Semarang didominasi oleh material lunak (aluvium), sehingga kompresibilitasnya tinggi dan berpengaruh terhadap penurunan muka tanah. Menurut Sota (2011), penurunan permukaan tanah di Kota Semarang disebabkan karena adanya patahan akibat proses tektonik. Hal ini didasarkan pada kajian peta amblesan tanah, peta struktur geologi dan pola morfologi yang menunjukkan bahwa pola amblesan tanah berhubungan dengan pola struktur patahan (Liana, Wea, Syarifah, Supriyadi, & Khumaedi, 2020).

Mikroseismik adalah metode geofisika yang dapat menggambarkan kondisi geologi dekat permukaan area penelitian dengan pemanfaatan getaran alami beramplitudo rendah yang timbul karena peristiwa alam (angin, gelombang laut) ataupun karena aktivitas manusia (kendaraan atau orang berjalan). Ambient noise biasa terdapat di rekaman gerak tanah yang menunjukkan tanah tidak pernah benar-benar diam. Hal ini disebabkan oleh semua sumber energi penghasil gelombang seismik seperti lautan dan bahaya cuaca yang konstan, menunjukkan latar belakang adanya noise setiap saat (Febriani, Daruwati, & Hatika, 2013). Mikroseismik memiliki frekuensi lebih tinggi dibandingkan frekuensi gempa bumi, dengan periodenya kurang dari 0,1 detik yang secara umum antara 0,05-2 detik dan untuk mikroseismik periode panjang bisa 5 detik, sedangkan amplitudonya berkisar 0,1-2,0 mikron (Haerudin, Fikri, & Rustadi, 2019).

Metode mikroseismik merupakan metode pasif dan berbeda dengan seismik yang termasuk kategori metode aktif sehingga memerlukan sumber getaran untuk memperoleh suatu data. Keunggulan dari mikroseismik adalah relatif murah dan ramah lingkungan karena memanfaatkan getaran lemah dari dalam bumi dan berlangsung secara terus menerus diakibatkan dari adanya sumber getaran (Adib, Afzal, & Heydarzadeh, 2014; Claprod, Asten, & Kristek, 2011). Metode mikroseismik sangat cocok untuk menentukan nilai frekuensi alami lapisan tanah dan kerentanan suatu daerah terhadap gempa (Warnana, Soemitro, & Utama, 2011). Semakin rendah nilai frekuensi natural suatu wilayah, maka dapat dinyatakan tingkat kerentanan gempa daerah tersebut semakin tinggi. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sarah *et al.* pada tahun 2013, menunjukkan bahwa kota Semarang bagian barat mengalami penurunan muka tanah. Atas dasar latar belakang yang telah terpapar, peneliti mengangkat topik dengan judul Kajian Struktur Bawah Tanah Berdasarkan Parameter Mikroseismik di Kota Lama Semarang yang bertujuan untuk mengetahui kerentanan tanah dan kajian struktur bawah permukaan di Kota Lama menggunakan metode mikroseismik dengan harapan dapat bermanfaat bagi khalayak umum.

METODE PENELITIAN

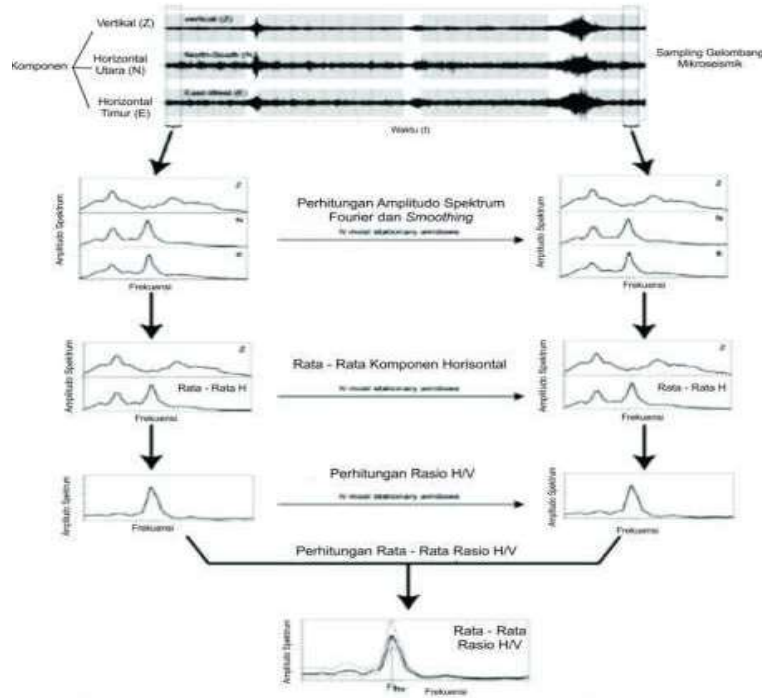
Penelitian ini dilakukan di Kota Lama Semarang pada bulan September 2021 dengan menggunakan alat berupa Seismometer M.A.E tipe S3S yang dilengkapi dengan Vibralog dan kabel fiber optic (Pratiwi, 2020). Seismometer M.A.E adalah seperangkat perlengkapan seismik pasif 24bit yang digunakan untuk akuisisi mikrotremor. Seismometer pada perangkat ini terdiri dari 3 komponen (x, y, dan z). Pengambilan data dilakukan pada 40 titik yang berbeda dengan durasi masing-masing titik adalah 30 menit.

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)* dapat digunakan sebagai analisis data mikrotremor (Arifudin, 2018) yang didasarkan pada asumsi bahwa fungsi perpindahan didapatkan dari rasio perbandingan spektrum horizontal dan vertikal dari getaran permukaan (Satria, Resta, & Muchtar, 2020). Noghosi dan Igarashi mencetuskan metode HVSR yang kemudian dikenal dengan Teknik Nakamura karena metode ini dipublikasikan oleh Nakamura (Anggraini, 2018). Metode ini dianggap efektif (mudah dan murah) untuk digunakan dalam memahami sifat-sifat struktur lapisan bawah tanah karena dapat dilakukan tanpa memberikan gangguan pada struktur tanah (Susilo & Wiyono, 2012). Metode HVSR biasa dipakai pada seismik pasif (mikroseismik) tiga komponen (Anggraini, 2018). Persamaan (1) merupakan rumus metode HVSR menurut Nakamura (Pratama, Priyanto, & Negara, 2020):

$$HVSR = \frac{S_H}{S_V} = \frac{\sqrt{(S_{N-S})^2 + (S_{E-W})^2}}{S_V} \quad (1)$$

Dalam mengolah data mikrotremor berupa file format “.SG2” digunakan metode HVSR dengan bantuan *software* Geopsy. Microsoft Excel sebagai alat analisis data dan *software* Surfer 11 sebagai alat interpretasi data. Hasil pengukuran tercatat ke dalam tiga komponen yaitu gelombang seismik horizontal (Timur-Barat), horizontal (Utara-Selatan), dan vertikal (Wahyudin, Sulistiawaty, & Ihsan, 2019). Data mikrotremor diolah dengan melakukan *windowing* dan *cutting* untuk pemilihan sinyal tanpa *noise* (Setiawati, 2016). Gambar 1 menunjukkan deskripsi perhitungan dengan metode HVSR.

Gambar 1
 Deskripsi perhitungan metode HVSR (Nakamura, 1989) yang dimodifikasi



Keterangan: Sunardi et al., 2012

Nakamura (2000) menjelaskan bahwa frekuensi natural dan faktor amplifikasi daerah pengukuran dapat diketahui dengan HVSR yang selanjutnya digunakan untuk mengestimasi indeks kerentanan tanah (Pratama *et al.*, 2020). Frekuensi dominan yang terdapat pada suatu daerah disebut dengan frekuensi natural, sedangkan besarnya penguatan gelombang ketika melalui medium tertentu disebut sebagai amplifikasi. Jenis tanah dapat direpresentasikan oleh nilai frekuensi natural (Sulistiawan, 2016).

Dengan menggunakan data amplifikasi dan data frekuensi natural pada tiap titik yang diperoleh, digunakan untuk mencari parameter-parameter seperti indeks kerentanan seismik, *Peak Ground Acceleration (PGA)*, dan *Ground Shear Strain (GSS)*. Data-data tersebut dianalisis menggunakan *software* Microsoft Excel.

Pertama, K_g . Nilai dari parameter Indeks Kerentanan Seismik (K_g) dapat digunakan untuk menganalisis kerentanan tanah yang mengalami deformasi pasca gempa bumi. Persamaan (2) untuk menghitung parameter K_g :

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (2)$$

Keterangan:

K_g = Indeks kerentanan; A_0 = nilai amplifikasi; f_0 = frekuensi dominan (Hz) (Pratama *et al.*, 2020)

Kedua, PGA. Percepatan getaran tanah maksimum adalah nilai percepatan getaran tanah terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat yang diakibatkan oleh gelombang gempa bumi (Febriani *et al.*, 2013). Semakin besar nilai percepatan getaran tanah maksimum maka gempa bumi yang dirasakan dianggap semakin kuat, berenergi besar, dan dianggap semakin beresiko membuat kerusakan (Fatimah, Ardianto, & Qomariyah, 2019). Parameter PGA dapat dihitung menggunakan persamaan (3).

$$a_{\max} = \frac{S}{\sqrt{T_0}} 10^{(0,61M) - \left(1,66 + \frac{3,6}{R}\right) \log R + \left(0,16 - \frac{1,87}{R}\right)} \quad (3)$$

Keterangan:

a_{\max} = Peak Ground Acceleration; T_0 = periode dominan (Hz); M = magnitude gempa bumi (SR); R = hiposenter (km) (Wahyudin *et al.*, 2019)

Percepatan pergerakan tanah (PGA) memerlukan data gempa bumi yang pernah terjadi di sekitar daerah tersebut (Wahyudin *et al.*, 2019). Oleh karena itu, digunakan data gempa yang terjadi pada tanggal 27 Mei 2006 di Yogyakarta dengan magnitude gempa 6,3 SR pada kedalaman 12 km.

Ketiga, GSS. GSS merupakan kemampuan suatu material lapisan tanah untuk meregang dan bergeser saat terjadi gempa bumi. Daerah yang memiliki nilai GSS tinggi memiliki resiko tinggi terhadap Gerakan tanah akibat gempa bumi, seperti penurunan tanah, getaran tanah, dan peregangan tanah. Parameter GSS dirumuskan dengan persamaan (4).

$$\gamma = \frac{A_0}{H} d \quad (4)$$

Keterangan

γ = Ground Shear Strain; H = ketebalan lapisan lapuk; d = perpindahan gelombang seismik di batuan dasar (Pancawati *et al.*, 2016)

Besar nilai H dapat diperoleh dengan rumus $V_s/4f_0$ dimana telah ditetapkan nilai V_s sebesar 225.76. Sedangkan untuk nilai d didapatkan dari parameter PGA yang dibagi dengan $(2\pi f_0)^2$. Setelah didapatkan nilai indeks kerentanan seismik, PGA, dan GSS, dilakukan interpretasi menggunakan *software* Surfer untuk mendapatkan peta kontur masing-masing variabel. Gambar 2 menunjukkan petalokasi titik pengukuran mikroseimik Kota Lama Semarang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Frekuensi alami yang terdapat pada daerah mempunyai besar nilai yang dapat menunjukkan jenis, karakteristik, dan tapak suatu daerah dan disebut sebagai frekuensi natural (Maulana, Arwa, Wibowo, Purwanta, & Kiswanti, 2019). Frekuensi alami merupakan frekuensi dasar yang dimiliki suatu daerah untuk merambatkan getaran atau gelombang, dengan konteks berupa getaran gempa bumi yang merambat di wilayah geologi tersebut. Nilai frekuensi natural

Gambar 2

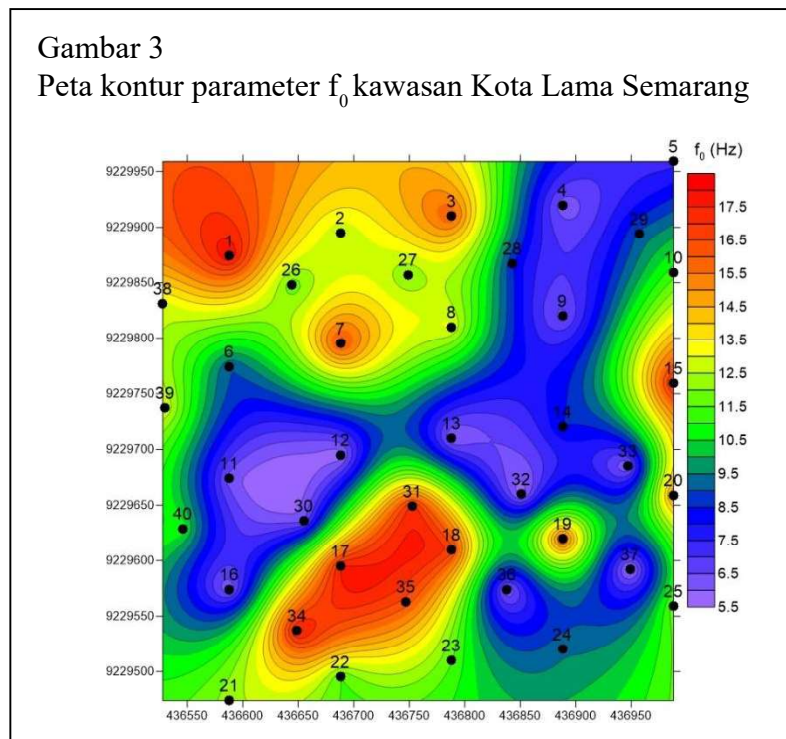
Peta lokasi titik pengukuran mikroseismik di kawasan Kota Lama Semarang



saling berkaitan dengan kedalaman bidang pantul gelombang. Bidang pantul berhubungan dengan batas antara sedimen lepas dan batuan keras. Semakin kecil nilai f_0 , maka akan semakin berhubungan dengan tebal sedimen atau dalamnya bidang pantul. Gambar 3 adalah peta persebaran nilai frekuensi dominan daerah Kota Lama Semarang yang diperoleh menggunakan *software* Surfer 11:

Gambar 3

Peta kontur parameter f_0 kawasan Kota Lama Semarang



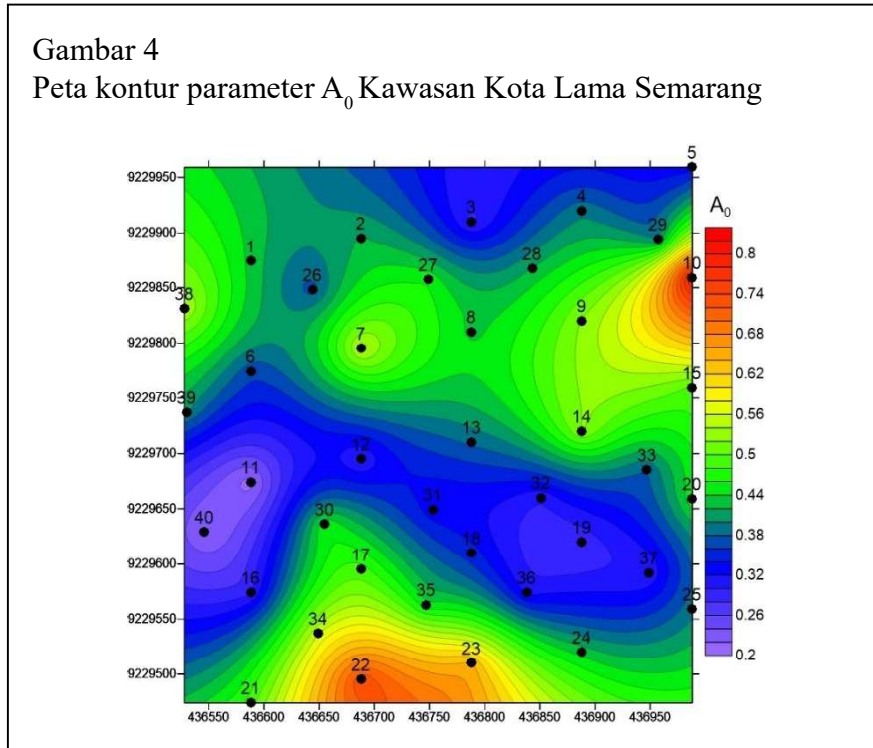
Sebaran nilai frekuensi yang dominan di daerah tersebut dari hasil pengolahan data dan analisis HVSR memperoleh nilai frekuensi natural yang relatif berbeda yaitu pada kisaran 5,5-18 Hz yang ditunjukkan oleh Gambar 3. Daerah yang memiliki frekuensi natural paling tinggi berada pada titik pengukuran nomor 1 dengan nilai f_0 sebesar 18.0302 Hz dan daerah yang memiliki frekuensi natural paling rendah berada pada titik pengukuran nomor 37 dengan nilai f_0 sebesar 5.44822 Hz. Berdasarkan frekuensi yang didapatkan, daerah yang berwarna ungu muda dengan rentang frekuensi natural sekitar 5.5-7 Hz memiliki klasifikasi tanah lebih lunak dibandingkan dengan daerah lainnya. Sedangkan untuk daerah yang berwarna biru hingga merah dengan rentang frekuensi natural sekitar 7-18 Hz memiliki klasifikasi tanah yang lebih keras dengan ketebalan lapisan sedimen permukaannya lebih tipis dibandingkan dengan daerah berwarna ungu. Adapun frekuensi natural gempa menurut teori Nakamura adalah sekitar 5-15 Hz (Aditama, Saadi, & Nurcahya, 2020). Nakamura menjelaskan bahwa f_0 saling berkaitan dengan kedalaman batuan dasar. Apabila nilai f_0 semakin kecil, kedalaman batuan dasar semakin besar. Menurut Koesuma, Pratiwi, & Legowo (2018), respons bangunan saat terjadi gempa bumi dipengaruhi oleh ketebalan sedimen yang mana berperan sebagai pengamplifikasi magnitude gempa.

Amplifikasi adalah pertambahan besarnya gelombang seismik akibat perbedaan yang signifikan antar lapisan atau perambatan gelombang seismic pada suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium awal (Hafid, Kholifatun, Tahlisiamita, Rohmaniyah, & Supriyadi, 2017). Ketika kedua parameter tersebut memiliki perbedaan yang besar, nilai amplifikasi perambatan gelombang akan semakin bertambah. Densitas material dan kecepatan gelombang geser mempengaruhi faktor amplifikasi.

Daerah yang memiliki nilai amplifikasi yang tinggi disebabkan karena adanya lapisan sedimen yang cukup tebal dan juga disebabkan adanya deformasi sehingga mengubah sifat fisik batuan tersebut. Manakala perbedaan antara kedua parameter tersebut semakin besar, maka nilai amplifikasi perambatan gelombang akan semakin bertambah. Faktor amplifikasi dapat dipengaruhi oleh densitas material dan kecepatan gelombang geser (Maulana *et al.*, 2019). Gambar 4 menunjukkan peta persebaran nilai faktor amplifikasi daerah Kota Lama Semarang yang diperoleh menggunakan *software* Surfer 11.

Sebaran nilai amplifikasi (A_0) berdasarkan Gambar 4 hanya dalam kisaran antara 0,2-0,86. Daerah yang memiliki nilai amplifikasi paling rendah berada pada titik pengukuran nomor 11 dengan nilai A_0 sebesar 0,211361 dan daerah yang memiliki nilai amplifikasi paling tinggi berada pada titik pengukuran nomor 10 dengan nilai A_0 sebesar 0,811675. Wang dan Hao (2002) menjelaskan bahwa variasi parameter sedimen (modulus geser, dumping rasio, dan densitas), dan saturasi lapisan sedimen mempengaruhi faktor amplifikasi (Warnana *et al.*, 2011), sehingga faktor geologi sangat dominan terhadap variasi nilai amplifikasi. Dalam penelitian yang dilakukan Daryono, Sartohadi, Dulbahri, dan Brotopuspito (2009) di Bantul, Yogyakarta menunjukkan bahwa korelasi antara A_0 dan rasio kerusakan adalah daerah yang mengalami kerusakan paling tinggi ternyata mempunyai A_0 yang lebih besar dari daerah lain. Dapat dilihat pada bangunan-bangunan yang berdiri di Kota Lama Semarang masih terlihat kokoh dan belum mengalami kerusakan dikarenakan distribusi faktor amplifikasi yang dominan rendah pada seluruh area pengukuran. Area yang memiliki nilai faktor amplifikasi lebih dari 6 termasuk dalam klasifikasi tinggi, yang menunjukkan saat ada gempa beramplifikasi tinggi memungkinkan terjadinya kerusakan parah pada daerah tersebut.

Gambar 4
Peta kontur parameter A_0 Kawasan Kota Lama Semarang



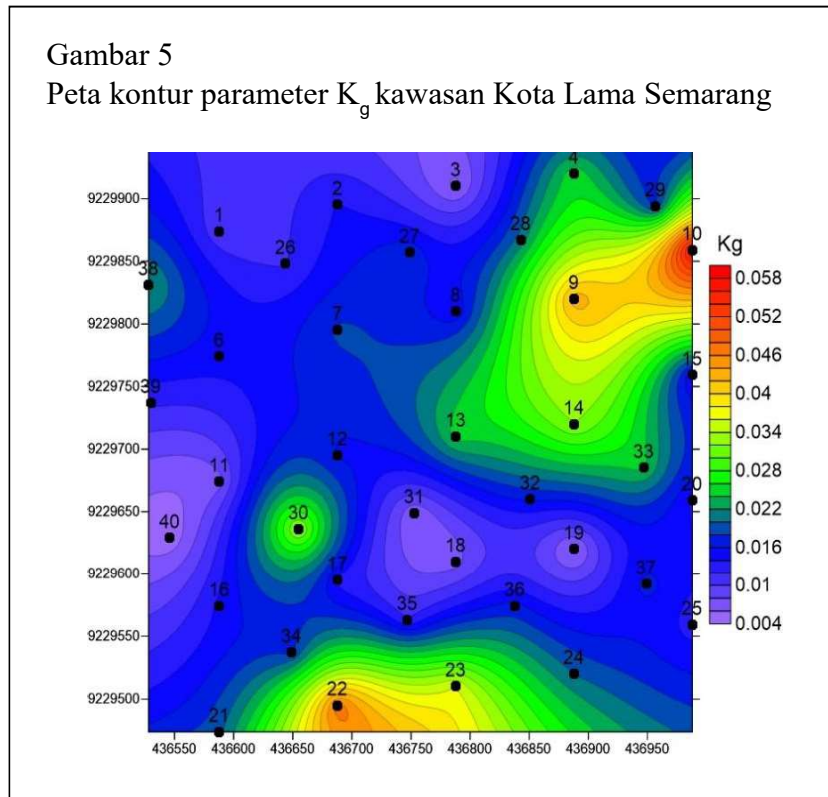
Indeks yang mendefinisikan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempa bumi dinamakan dengan Indeks Kerentanan Seismik (K_g) yang menurut Nakamura (2000), indeks ini dapat diperoleh dengan mengkuadratkan nilai puncak spektrum mikrotremor (A_0) kemudian dibagi dengan nilai frekuensi resonansi (f_0) (Febriani *et al.*, 2013). Tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempa didefinisikan sebagai Indeks Kerentanan Seismik. Ketebalan lapisan sedimen yang meliputi lapisan batuan dasar dan lapisan lapuk di atas batuan dasar, akan mempengaruhi deformasi lapisan tanah (Nakamura, 2008). Berikut adalah peta persebaran nilai indeks kerentanan seismik daerah Kota Lama Semarang yang diperoleh menggunakan *software* Surfer 11:

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa indeks kerentanan seismik di daerah tersebut berkisar 0,004-0,058 s^2/cm dengan persebaran nilai yang dapat dilihat pada Gambar 5. Daerah yang memiliki indeks kerentanan seismik tinggi berada pada titik pengukuran nomor 10 dengan nilai K_g sebesar 0,05845 s^2/cm dan daerah yang memiliki indeks kerentanan seismik rendah berada pada titik pengukuran nomor 40 dengan nilai K_g sebesar 0,00453 s^2/cm . Berdasarkan analisis data, nilai indeks kerentanan seismik di daerah Kota Lama termasuk dalam kategori rendah.

Semakin lunak litologi batuan pada tanah (seperti sedimen) maka akan semakin tinggi nilai K_g pada daerah tersebut sehingga menyebabkan daerah tersebut sering mengalami guncangan yang besar saat gempa. Begitupun dengan semakin kokohnya litologi batuan maka akan semakin kecil nilai K_g pada daerah tersebut yang menyebabkan daerah tersebut tidak mengalami banyak guncangan saat gempa.

Daerah Kota Lama Semarang cenderung memiliki nilai K_g yang rendah, dengan begitu kerusakan yang didapatkan tidak terlalu parah karena tidak mengalami banyak guncangan.

Gambar 5
Peta kontur parameter K_g kawasan Kota Lama Semarang



Adanya nilai yang bervariasi pada parameter indeks kerentanan seismik menunjukkan adanya variasi pula pada parameter GSS. Nilai renggang-geser suatu wilayah akan tinggi jika nilai parameter K_g -nya tinggi. Jika suatu wilayah terindikasi memiliki nilai renggang-geser yang tinggi, prediksi fenomena yang terjadi pada daerah tersebut saat gempa adalah getaran dan gelombang gempa yang terasa sampai permukaan yang mengakibatkan timbulnya retakan tanah.

PGA didefinisikan sebagai nilai percepatan getaran tanah maksimum yang pernah terjadi di suatu daerah yang diakibatkan dari gelombang gempa bumi (seismik) yang merambat di lapisan tanah daerah tersebut dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik lapisan tanah suatu daerah (Widyawarman & Fauzi, 2020). Nama lain dari PGA yaitu *Design Basis Earthquake Ground Motion (DBEGM)*.

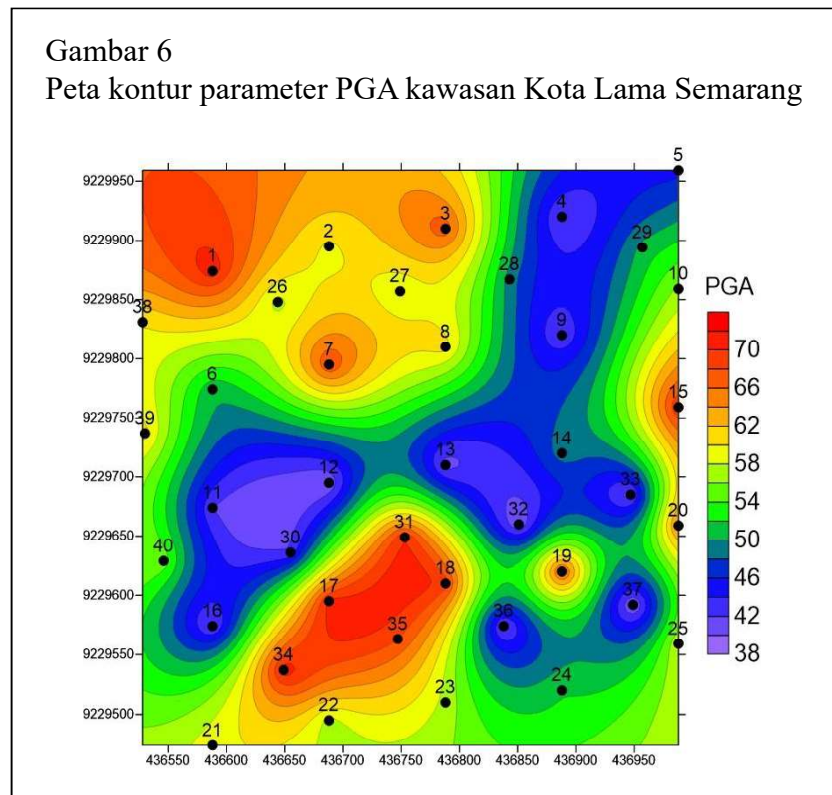
Klasifikasi tingkat risiko gempa bumi dengan rentang skala Percepatan Getaran Tanah ditunjukkan pada Tabel 1. Gambar 6 adalah peta persebaran nilai PGA daerah Kota Lama Semarang yang diperoleh menggunakan *software* Surfer 11.

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa Kota Lama didominasi oleh nilai PGA dengan tingkat risiko rendah karena rentang nilai PGA yang didapat di daerah penelitian berkisar antara 38-71 gal sehingga termasuk dalam kategori skala ke-II SIG BMKG. Dampak yang didapatkan jika terjadi gempa di daerah tersebut adalah getaran yang dirasakan oleh banyak orang, benda-benda bergoyang dan bergetar, namun tidak menimbulkan adanya kerusakan. Distribusi spasial nilai PGA tertinggi terletak pada titik nomor 1 dengan nilai PGA yaitu sebesar 71,314 gal; sementara nilai PGA terendah terletak pada titik nomor 37 dengan nilai PGA sebesar 39,357 gal. Menurut teori, dalam kondisi daerah yang terdapat sumber gempa, semakin besar nilai

Tabel 1
Skala Intensitas Gempa Bumi Menurut BMKG

| Skala SIG BMKG | Warna | Deskripsi Sederhana | Deskripsi Rinci | Skala MMI | PGA (gal) |
|----------------|--------|---|--|-----------|-----------|
| I | Putih | Tidak Dirasakan (<i>Not Felt</i>) | Tidak dirasakan atau dirasakan hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat. | I-II | <2.9 |
| II | Hijau | Dirasakan (<i>Felt</i>) | Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar. | III-V | 2.9-88 |
| III | Kuning | Kerusakan Ringan (<i>Slight Damage</i>) | Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan seperti retak rambut pada dinding bangunan, atap bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan. | VI | 89-167 |
| IV | Jingga | Kerusakan Sedang (<i>Moderate Damage</i>) | Banyak retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar atap bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang. | VII-VIII | 168-564 |
| V | Merah | Kerusakan Berat (<i>Heavy Damage</i>) | Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung. | IX-XII | >564 |

Gambar 6
Peta kontur parameter PGA kawasan Kota Lama Semarang



PGA maka pergerakan tanah daerah tersebut semakin cepat begitupun dengan semakin kecil nilai PGA maka pergerakan tanah daerah tersebut semakin lambat.

Nilai PGA dan perhitungan kerentanan seismik dimaksudkan untuk mengetahui kerawanan bahaya suatu wilayah terhadap gempa bumi. Secara umum, semakin dekat suatu wilayah dengan sumber gempa maka semakin besar kerusakan yang akan terjadi, tetapi hal ini bergantung oleh geologi lokal dan berdampak signifikan terhadap kerusakan akibat gempa bumi. Dapat disimpulkan bahwa besarnya kerusakan yang dapat terjadi bergantung pada kekuatan dan kualitas bangunan, kondisi geologi, struktur bangunan, besarnya PGA, dan indeks kerentanan seismik di daerah tempat terjadinya gempa bumi (Febriani *et al.*, 2013).

GSS yaitu kemampuan material untuk menggeser atau meregang ketika terjadi gempa bumi sehingga nilai GSS dapat mempengaruhi kemungkinan besar risiko kerusakan suatu wilayah ketika terjadi gempa. Tabel 2 menunjukkan hubungan antara γ dengan sifat dinamik tanah. Pendekatan nilai GSS ini sangat penting, dimana semakin besar nilai GSS maka semakin besar pula kemungkinan kerusakan suatu wilayah ketika gempa bumi dan sebaliknya semakin kecil nilai GSS maka semakin kecil pula kemungkinan kerusakan yang terjadi di suatu wilayah ketika gempa bumi.

Gambar 7 adalah peta persebaran nilai GSS daerah Kota Lama Semarang yang diperoleh menggunakan *software* Surfer 11. Pada Gambar 7, ditunjukkan bahwa wilayah yang memiliki

Tabel 2.

Hubungan antara γ dengan sifat dinamik tanah (Nakamura, 2008)

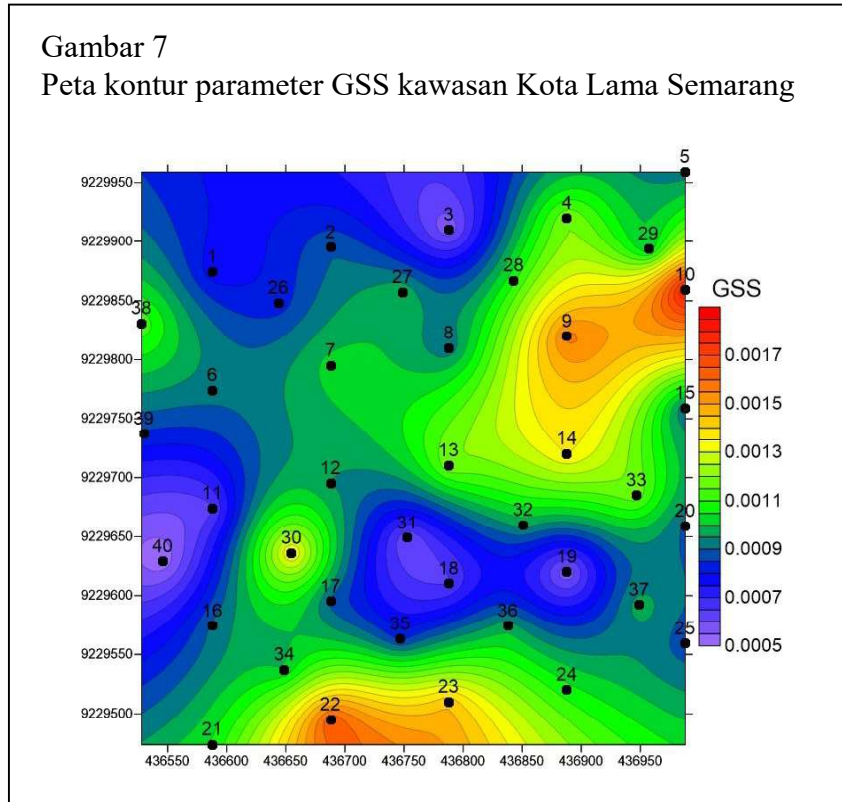
| Ukuran Strain | $10^{-6} - 10^{-5}$ | $10^{-4} - 10^{-3}$ | $10^{-2} - 10^{-1}$ |
|---------------|---------------------|--------------------------|--|
| Fenomena | Getaran, Gelombang | Rekahan, Penurunan Tanah | Tanah longsor, pemadatan, pencairan |
| Sifat Dinamis | Elastisitas | Elasto-plastisitas | Efek yang berulang, efek proses dari kecepatan |

Sumber: Nakamura (2008)

nilai GSS paling besar pada kontur warna merah di titik pengukuran nomor 10 dengan nilai GSS sebesar 0. Sedangkan untuk titik pengukuran nomor 40 memiliki nilai GSS paling rendah yaitu sebesar 0,000509617 yang ditandai warna ungu. Rentang nilai GSS daerah Kota Lama berkisar antara 0,0005-0,0018 sehingga termasuk dalam kategori sifat dinamika tanah berupa elasto-plastisitas dimana jika terjadi gempa di sekitar daerah tersebut, fenomena yang terjadi adalah adanya rekahan dan penurunan tanah. Hal tersebut sesuai dengan kondisi yang terjadi di daerah Kota Lama Semarang yang terdapat banyak permukaan jalan yang bergelombang akibat adanya penurunan tanah.

Semakin tinggi nilai GSS maka semakin mudah lapisan tanah tersebut mengalami deformasi, dan jika terjadi gempa bumi maka lapisan tanah akan mengalami longsor dan likuifaksi (Wibowo & Niyartama, 2015). Sedangkan semakin rendah nilai GSS maka sifat lapisan tanah semakin kokoh dan sulit mengalami deformasi, tetapi tidak menyebabkan longsor saat terjadi gempa dan likuifaksi hanya merasakan gelombang getaran gempa bumi. Artinya, semakin tinggi nilai GSS maka semakin besar tingkat kerentanan di suatu wilayah (Pancawati, Supriyadi, & Khumaedi, 2016).

Gambar 7
Peta kontur parameter GSS kawasan Kota Lama Semarang



SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Daerah Kota Lama Semarang nilai frekuensi dominan yang relatif seragam berada pada kisaran antara 5.5-18 Hz. Nilai amplifikasi (A_0) di daerah kota lama Semarang hanya dalam kisaran antara 0,2-0,86 dengan besar distribusi faktor amplifikasi dominan rendah. Hasil indeks kerentanan gempa pada kota lama berada pada rentang 0,004-0,058 s^2/cm termasuk dalam kategori rendah. Daerah kota lama memiliki nilai PGA berkisar 38-71gal yang termasuk dalam kategori skala ke-II SIG BMKG. Dampak yang didapatkan jika terjadi gempa di daerah tersebut adalah getaran yang dirasakan oleh banyak orang, benda-benda bergoyang dan bergetar, namun tidak menimbulkan adanya kerusakan. Hal tersebut dapat menyebabkan pergerakan atau perubahan kecepatan yang lambat apabila terdapat sumber gempa. Rentang nilai GSS pada kota lama Semarang berkisar antara 0.0005-0.0018 termasuk dalam kategori sifat dinamika tanah berupa elesto-plastisitas.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih diucapkan kepada Kemenristek/BRIN yang telah mendanai penelitian ini dengan SKIM penelitian dasar nomor kontrak: 24.25.3.3/UN37/PPK.6.8/2021.

DAFTAR PUSTAKA

Adib, A., Afzal, P., & Heydarzadeh, K. (2014). Site effect classification based on microtremor data analysis Site effect classification based on microtremor data analysis using concentration-area fractal model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 1(2), 1133-1161. <https://doi.org/10.5194/npgd-1-1133-2014>.

- Aditama, M. R., Saadi, A. G., & Nurcahya, B. E. (2020). Investigasi kerentanan tanah berpotensi likuefaksi menggunakan metode mikroseismik di wilayah Prambanan, Yogyakarta. *Dinamika Rekayasa*, 16(2), 105-111. <http://dinarek.unsoed.ac.id>.
- Anggraini, N. P. (2018). *Analisis data mikroseismik untuk penentuan indeks kerentanan bangunan (Studi Kasus di Waduk Kedung Ombo Kecamatan Geyer, Kabupaten Gerobogan)* (Skripsi). Universitas Negeri Semarang.
- Arifudin, A. M. (2018). *Karakteristik situs dan kerentanan seismik di Kabupaten Klaten dengan metode horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) dari data mikrotremor* (Tesis). Universitas Islam Indonesia.
- Bahri, S., & Madlazim. (2012). Pemetaan topografi, geofisika dan geologi kota Surabaya. *Jurnal Penelitian Fisika Dan Aplikasinya (JPFA)*, 2(2), 23-28.
- Claprod, M., Asten, M. W., & Kristek, J. (2011). Using the SPAC microtremor method to identify 2D effects and evaluate 1D shear-wave velocity profile in valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(2), 826-847. <https://doi.org/10.1785/0120090232>.
- Daryono, S., Sartohadi, J., Dulbahri, K., & Brotopuspito, S. (2009). *Efek tapak lokal (Local site effect) di Graben Bantul berdasarkan pengukuran mikrotremor*. International Conference Earth Science and Technology, Yogyakarta.
- Dewantara, G. A. H., & Astuti, P. (2017). Kajian implementasi program revitalisasi kawasan Kota Lama sebagai kawasan pariwisata di Kota Semarang. *Journal of Politic and Government Studies*, 6(4), 41-50.
- Fatimah, R., Ardianto, T., & Qomariyah, N. (2019). Mikrozonasi gempa bumi di Desa Medana dan Jenggala Kecamatan Tanjung Kabupaten Lombok Utara menggunakan metode mikroseismik. *Indonesian Physical Review*, 2(1), 18–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.29303/ipr.v2i1.19>
- Febriani, Y., Daruwati, I., & Hatika, R. G. (2013). Analisis nilai peak ground acceleration dan indeks kerentanan seismik berdasarkan data mikroseismik pada daerah rawan gempabumi di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmiah Edu Research*, 2(2), 85-90.
- Haerudin, N., Fikri, A., & Rustadi. (2019). *Mikroseismik, mikrotremor dan microearthquake dalam ilmu kebumihan*. Pusaka Media.
- Hafid, R. H., Kholifatun, N. N., Tahlisiamita, A., Rohmaniyah, F., & Supriyadi. (2017). Percepatan tanah berdasarkan data mikroseismik wisata Bantir Sumowono Semarang. *UPJ*, 6(1), 54-59. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/upj>.
- Ikhsyan, N., Muryani, C., & Rintayati, P. (2017). Analisis sebaran, dampak dan adaptasi masyarakat terhadap banjir rob di Kecamatan Semarang Timur dan Kecamatan Gayamsari Kota Semarang. *Jurnal GeoEco*, 3(2), 145-156.
- Koesuma, S., Pratiwi, S., & Legowo, B. (2018). Penentuan ketebalan sedimen menggunakan metode mikrotremor di Kota Surakarta. *Risalah Fisika*, 2(1), 25-28. <https://doi.org/10.35895/rf.v2i1.73>
- Liana, Y. R., Wea, T. M. M., Syarifah, W., Supriyadi, & Khumaedi. (2020). Analisis anomali bouguer data gaya berat studi kasus di Kota Lama Semarang. *JRST (Jurnal Riset Sains Dan Teknologi)*, 4(2), 63–68. <https://doi.org/10.30595/jrst.v4i2.6301>.
- Maulana, A. R., Arwa, F. Y., Wibowo, N. B., Purwanta, & Kiswanti, S. (2019). *Analisis indeks kerentanan seismik dan percepatan maksimum berdasarkan model Vs30 USGS di Kabupaten Kulonprogo*. Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-12, Yogyakarta.

- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Q.R. of R.T.I*, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. The 12th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo.
- Nakamura, Y. (2008, October). *On the h/v spectrum*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing.
- Pancawati, K. D., Supriyadi, & Khumaedi. (2016). Identifikasi kerentanan dinding bendungan dengan menggunakan metode mikroseismik (Studi kasus Bendungan Jatibarang, Semarang). *Unnes Physics Journal*, 5(2), 21-26. <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/upj>.
- Prasetya, A. B., Yuwono, B. D., & Awaluddin, M. (2017). Pemantauan penurunan muka tanah Kota Semarang Tahun 2016 menggunakan perangkat lunak GAMIT 10.6. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(2), 21-28.
- Pratama, I. P. D., Priyanto, D. K., & Negara, P. K. G. A. (2020). Ambient seismic noise analysis of Nyepi celebration day in Denpasar, Bali using horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (HVSr). *Jurnal Geofisika*, 18(1), 23-26. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02424-0>.
- Pratiwi, N. A. (2020). *Identifikasi potensi pergerakan tanah berdasarkan analisis Ground Shear Strain (GSS) di Kampung Cemara, Desa Sukorejo, Kecamatan Gunungpati, Kota Semarang* (Skripsi). Universitas Negeri Semarang.
- Puspitasari, A. Y., & Ramli, W. O. S. K. (2018). Masalah dalam pengelolaan Kota Lama Semarang sebagai nominasi situs warisan dunia. *Jurnal Planologi*, 15(1), 96–114.
- Ramadhan, I. S., Muslim, D., Zakaria, Z., & Pramudyo, T. (2021). Penurunan permukaan tanah di Pesisir Pantai Utara Jawa, Desa Bandarharjo dan Sekitarnya, Kota Semarang, Jawa Tengah. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 5(4), 381-393.
- Sarah, D., Soebowo, E., Mulyono, A., Nugroho, D., & Satriyo, A. (2013). *Model geologi teknik daerah amblesan tanah kota Semarang Bagian Barat*. Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pulsit Geoteknologi LIPI (pp. 11-18).
- Satria, A., Resta, I. L., & Muchtar, N. (2020). Analisis ketebalan lapisan sedimen dan indeks kerentanan seismik Kota Jambi Bagian Timur. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 6(1), 18-30. <https://doi.org/10.23960/jge.c6i1.58>.
- Setiawati, Y. (2016). *Analisis GSS (Ground Shear Strain) dengan metode HVSr menggunakan data mikroseismik pada jalur sesar Opak* (Skripsi). Universitas Negeri Yogyakarta.
- Sota, I. (2011). Kajian geologi untuk identifikasi bencana di wilayah Kota Semarang. *Positron*, 1(1), 25-30.
- Sulistiawan, H. (2016). *Analisis seismic hazard berdasarkan data peak Ground Acceleration (PGA) dan kerentanan gempa menggunakan metode mikroseismik di daerah kampus Unnes Sekaran, Gunungpati, Kota Semarang* (Skripsi). Universitas Negeri Semarang.
- Sunardi, B., Daryono, Arifin, J., Susilanto, P., Ngadmanto, D., Nurdiyanto, B., & Sulastrri. (2012). Kajian potensi bahaya gempabumi daerah Sumbawa berdasarkan efek tapak lokal. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 13(2), 131-137.
- Susilo, A., & Wiyono, S. H. (2012). Frequency analysis and seismic vulnerability index by using Nakamura Methods at a new artery way in Porong, Sidoarjo, Indonesia. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 2(4), 227-230. <https://doi.org/10.7763/ijapm.2012.v2.97>.

- Wahyudin, Sulistiawaty, & Ihsan, N. (2019). Analisis kerentanan bendungan Ponre-Ponre Kabupaten Bone berdasarkan pengukuran mikrotremor dengan metode HVSR. *Jurnal Sains Dan Pendidikan Fisika (JSPF)*, 15(2), 90-96.
- Wang, S., & Hao, H. (2002). Effects of random variations of soil properties on site amplification of seismic ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), 551-564.
- Wardhana, D. D., Harjono, H., & Sudaryanto. (2014). Struktur bawah permukaan Kota Semarang Berdasarkan Data GayaBerat. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 24(1), 53-64. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2014.v24.81>.
- Warnana, D. D., Soemitro, R. A. A., & Utama, W. (2011). Application of microtremor HVSR method for assessing site effect in residual soil slope. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, 11(4), 73-78.
- Wibowo, N. B., & Niyartama, T. F. (2015). Mikrozonasi multidisaster daerah sekitar Waduk Sermo berbasis analisis keputusan multikriteria Simple Additive Weight (SAW) berdasarkan pengukuran mikrotremor. *Jurnal Dialog Dan Penanggulangan Bencana*, 6(1), 1-11.
- Widyawarman, D., & Fauzi, E. R. (2020). Aplikasi mikrotremor untuk mikrozonasi tingkat potensi bencana gempa bumi di kampus I Universitas PGRI Yogyakarta. *Jurnal Geosaintek*, 6(2), 87-96. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v6i2.6778>.