



Mikrozonasi Seismik : Sebuah Pendekatan Delineasi Penguatan Gelombang Seismik oleh Sedimen Permukaan untuk Penyediaan Data Dasar Penataan Ruang Wilayah, Studi Kasus: Daerah Demak, Jawa Tengah

Seismic Microzonation: An Approach to Delineating the Strengthening of Seismic Waves by Surface Sediments to Provide Basic Regional Spatial Data, Case Study of: Demak Region, Central Java

Marjiyono¹, Setiawan, J.H. ¹, Hidayat¹, Andriani, S. ¹, Ibrahim, A. ¹, Buana, W.T. ² dan Subagio³

¹ Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Jalan Diponegoro No. 57 Bandung

² Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi, Jalan Diponegoro No. 57 Bandung

³ Badan Riset dan Inovasi Nasional, BRIN

email : marjiyonomulyoraharjo@gmail.com

Naskah diterima: 21 Maret 2023, Revisi terakhir: 10 Juli 2023, Disetujui: 14 Agustus 2023 Online: 18 Agustus 2023

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v24i3.777>

Abstrak- Kerusakan bangunan dan infrastruktur dalam kejadian gempa bumi tidak hanya terkait dengan besaran gempa bumi dan jarak sumbernya, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi permukaan. Daerah dengan litologi permukaan yang belum mengalami konsolidasi cenderung menguatkan gelombang yang meningkatkan intensitas guncangan. Karakterisasi sedimen permukaan diperlukan dalam rangka mengidentifikasi nilai penguatan gelombang. Sebagai daerah yang telah ditetapkan menjadi Kawasan Strategis Nasional, ketersediaan data mikrozonasi seismik di daerah Demak dan sekitarnya untuk penataan ruang wilayah mutlak diperlukan. Pengukuran mikrotremor *array* dan *single station* telah dilakukan untuk memodelkan kondisi bawah permukaan dangkal. Hasil analisis nilai penguatan gelombang menunjukkan zona kerentanan tinggi menempati bagian tengah, timur dan utara daerah penyelidikan. Zona kerentanan tinggi direkomendasikan untuk pengembangan sektor-sektor beresiko rendah. Pengembangan perkotaan lebih lanjut direkomendasikan di zona kerentanan rendah.

Katakunci: tata ruang wilayah, penguatan gelombang, mikrozonasi seismik, mikrotremor, kerentanan.

Abstract- The damage of buildings and infrastructure during an earthquake is not only dependent on the magnitude of and the distance to the focus, but it is also strongly influenced by surface geological conditions. The unconsolidated surface sediment can amplify seismic waves and lead to stronger shaking intensity as compared to nearby harder sites. Surface sediment characterization is needed in order to identify the level of site amplification. The availability of seismic microzonation data in Demak urban area and its environs for spatial planning is vitally essential due to this area has been designated as a National Strategic Area. To model near surface geological conditions, combined-array and single station microtremor measurements have been carried out. The results of the site amplification analysis shows that high vulnerability zones occupy the central, eastern and northern parts of the investigation area. The development of the low risk sectors is advised in these zone. It is recommended to further urban development in the low vulnerability zone.

Keyword: spatial planing, site amplification, seismic microzonation, microtremor, vulnerability

LATAR BELAKANG

Daerah Demak dan sekitarnya merupakan bagian dari Kawasan Strategis Nasional (KSN) Kedungsepur, yang ditetapkan berdasarkan Peraturan Presiden No. 60 Tahun 2022 tentang Tata Ruang Kawasan Strategis Nasional Perkotaan Kendal, Demak, Ungaran, Salatiga, Semarang dan Purwodadi. Penataan ruang kawasan perkotaan Kedungsepur memiliki tujuan untuk menjadikan kawasan perkotaan ini sebagai salah satu pusat ekonomi berskala internasional yang berbasis pada perdagangan barang dan / atau jasa, industri, maritim, sumber daya kelautan, pariwisata dan ekonomi kreatif.

Berdasarkan peraturan presiden tersebut, rencana tata ruang kawasan perkotaan Kedungsepur ini berlaku selama dua puluh (20) tahun sejak ditetapkan dan akan dilakukan peninjauan kembali setiap lima (5) tahun. Peninjauan rencana tata ruang kawasan perkotaan ini dapat dilakukan lebih dari sekali dalam kurun waktu kurang dari 5 tahun apabila terjadi perubahan strategis berupa:

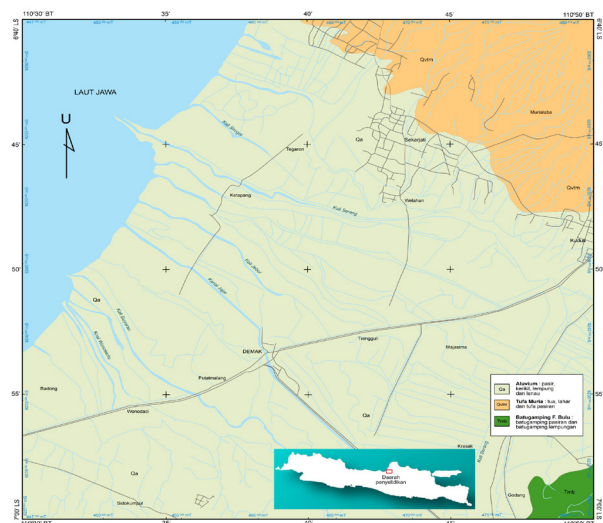
- Bencana alam skala besar yang ditetapkan dalam perundang-undangan,
- Perubahan batas daerah yang ditetapkan dengan undang-undang,
- Perubahan kebijakan nasional yang bersifat strategis.

Sebagai kawasan yang akan dikembangkan, maka kelengkapan data daya dukung dan potensi bencana geologi untuk keperluan perencanaan tata ruang wilayah di wilayah ini perlu diidentifikasi secara komprehensif. Potensi kebencanaan geologi khususnya gempabumi perlu dipertimbangkan dalam rangka mengurangi dampak negatif ketika bencana tersebut terjadi mengingat kawasan ini dekat dengan sumber gempabumi. Beberapa sesar aktif telah teridentifikasi diantaranya Sesar Kaligarang di wilayah Kabupaten dan Kota Semarang (Poedjoprajitno, dkk., 2008), Sesar Semarang, Sesar Rawapening, Sesar Ungaran 1, Sesar Ungaran 2, Sesar Muria, Sesar Pati dan Sesar Purwodadi (Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, 2017). Beberapa catatan kejadian gempabumi besar yang pernah terjadi di kawasan ini, yang diduga berasosiasi dengan aktifitas sesar-sesar tersebut di atas diantaranya adalah: Gempabumi Jepara 25 Desember 1821, Gempabumi Semarang 19 Januari 1856 Gempabumi Banyubiru 19 Juli 1865, Gempabumi Salatiga 10 Oktober 1872, Gempabumi Kudus 21 Februari 1877 dan Gempabumi Pati 12 Desember 1890 (Supartoyo, dkk., 2014). Kejadian-kejadian gempabumi tersebut memberikan gambaran bahwa potensi bencana gempabumi di wilayah Demak dan sekitarnya cukup besar.

Disamping faktor keberadaan sumber gempabumi yang berada di kawasan ini, potensi bencana juga dapat berasal dari kondisi litologi permukaan daerah Demak dan sekitarnya yang merupakan endapan lunak berupa aluvium. Catatan pada kejadian-kejadian gempabumi besar menunjukkan bahwa endapan-endapan muda cenderung memberikan efek penguatan gelombang (Boschi, dkk, 1995, Funicello dkk, 1995). Kajian ini dimaksudkan untuk memahami karakteristik litologi permukaan di wilayah perkotaan Demak dan sekitarnya kaitannya dengan potensi penguatan gelombang oleh lapisan lunak yang dapat dijadikan dasar dalam penentuan tingkat kerentanan terhadap bahaya gempabumi. Mikrozonasi seismik yang detil merupakan kunci dalam penataan ruang wilayah perkotaan (Hakimov, dkk., 2021)

GEOLOGI DAERAH PENYELIDIKAN

Secara fisiografi daerah Demak dan sekitarnya merupakan bagian dari dataran rendah yang memanjang hampir sepanjang pantai utara P. Jawa. Seperti pada umumnya dataran rendah, litologi daerah Demak didominasi oleh endapan aluvium hasil rombakan batuan di daerah yang lebih tinggi di selatan dan timur laut daerah ini. Endapan aluvium ini terdiri atas kerikil, pasir, lempung, lanau, sisa tumbuhan dan bongkah-bongkah batuan vulkanik. Berdasarkan Peta Geologi Lembar Kudus (Suwarti dan Wikarno, 1992), endapan aluvium ini menumpang di atas batuan Formasi Bulu yang berumur Miosen Akhir. Batuan Formasi Bulu tersingkap luas di selatan Demak berupa batugamping bersisipan batugamping pasiran dan lempungan. Di bagian timur laut daerah survei, morfologi berupa kerucut gunungapi Muria dengan litologi didominasi oleh batuan tufa produk dari G. Muria (Gambar 1).



sumber: Suwarti dan Wikarno (1992)

Gambar 1. Peta geologi daerah penyelidikan

METODOLOGI

Secara alamiah proses pengendapan litologi berlangsung secara bertahap yang menyebabkan kondisi litologi berlapis-lapis. Dalam kondisi normal batuan yang lebih tua berada di bawah / dalam, dan mempunyai rapat massa lebih besar karena lebih terkonsolidasi oleh beban statis material di atasnya. Kondisi batuan yang berlapis-lapis tersebut akan mempengaruhi tingkah laku penjalaran gelombang seismik. Gelombang seismik yang datang dari lapisan batuan lebih pejal ke lapisan batuan yang lebih lunak akan mengalami penguatan amplitudo. Secara umum untuk suatu daerah dengan *multi layer* sedimen, besarnya nilai penguatan gelombang dinyatakan dalam persamaan berikut (Prabowo, dkk, 2016) :

$$A = \sum_{i=0}^N \left(\frac{\rho_i V_{si}}{\rho_{(i+1)} V_{s(i+1)}} \right) \exp \left(- \frac{\pi f_{oi} h_i}{Q_i V_{si}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

dengan

- A : besarnya nilai penguatan gelombang
- ρ_i : rapat masa batuan lapisan ke i
- V_{si} : Kecepatan gelombang geser pada batuan lapisan ke i
- h_i : ketebalan lapisan batuan ke i
- f_{oi} : frekuensi resonan oleh lapisan batuan ke i
- Q_i : faktor kualitas lapisan batuan ke i.

Dalam tataran praktis, pengukuran nilai frekuensi resonan untuk setiap lapisan batuan sulit dilakukan, sehingga dalam kajian ini dilakukan pendekatan dengan model sederhana dua (2) lapis litologi. Kedua lapisan tersebut mewakili lapisan lunak di permukaan dan lapisan yang mengalasinya, yang mempunyai kontras impedansi cukup besar. Untuk model geologi bawah permukaan dua lapis, secara matematik persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi sebagai berikut :

$$A_2 = \left(\frac{\rho_b V_{sb}}{\rho_s V_{ss}} \right) \exp \left(- \frac{\pi f_o h_s}{Q_s V_{ss}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

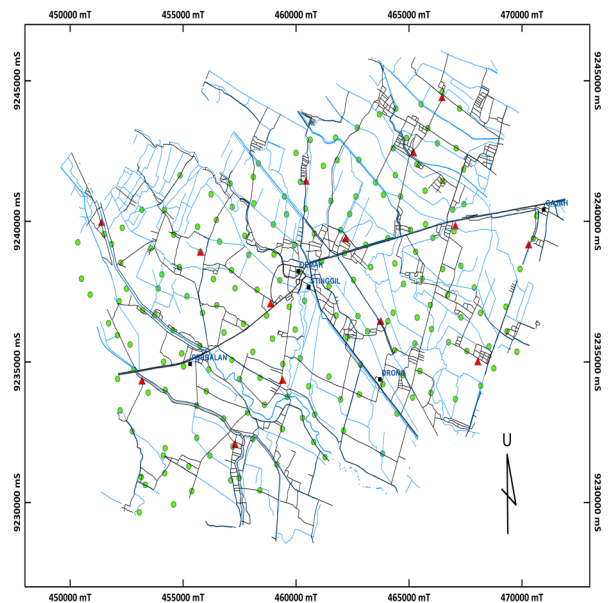
dengan

- A_2 : besarnya nilai penguatan gelombang model 2 lapis
- ρ_s : rapat masa batuan sedimen permukaan
- ρ_b : rapat masa lapisan batuan yang mengalasi sedimen permukaan
- V_{ss} : Kecepatan gelombang geser lapisan batuan sedimen permukaan
- V_{sb} : Kecepatan gelombang geser lapisan batuan yang mengalasi sedimen permukaan
- h_s : ketebalan lapisan sedimen permukaan
- f_o : frekuensi resonan oleh lapisan batuan sedimen permukaan

Q_s : faktor kualitas lapisan batuan sedimen permukaan

Data yang digunakan dalam penyelidikan ini adalah data mikrotremor *array* dan mikrotremor *single station*. Data mikrotremor *array* diukur di 14 lokasi yang tersebar di daerah penyelidikan yang selanjutnya dilakukan inversi untuk memperoleh model kecepatan gelombang geser 1D. Proses interpolasi dilakukan terhadap seluruh data model 1D untuk memperoleh gambaran sebaran kecepatan gelombang geser secara lateral di seluruh daerah penyelidikan. Adapun pengukuran mikrotremor *single station* dilakukan di 207 lokasi dengan jarak rata-rata antar titik ukur sekitar 1 km (Gambar 2).

Data mikrotremor *single station* berupa data spektrum HVSR (*horizontal to vertical spectral ratio*) yang digunakan untuk menentukan frekuensi resonan situs (*site*). Rong, dkk., 2018, Dimitriu, dkk., 1998; Satoh, dkk., 2001, menyatakan bahwa metode mikrotremor *single station* HVSR *reliable* untuk menentukan nilai frekuensi resonan situs, namun demikian tidak ada kesepakatan dari para peneliti mengenai amplitudo kaitannya dengan nilai penguatan gelombang. Dalam penyelidikan ini, hanya digunakan frekuensi resonan, adapun amplitude spektrum HVSR tidak digunakan. Berdasarkan data model kecepatan gelombang geser hasil inversi data mikrotremor *array* dan data frekuensi resonan serta ketebalan sedimen permukaan dari spektrum HVSR mikrotremor *single station*, maka nilai penguatan gelombang dapat dihitung (persamaan 2).



Gambar 2. Lokasi daerah penyelidikan, lingkaran warna hijau adalah titik ukur mikrotremor *single station*, segitiga warna merah adalah titik ukur mikrotremor *array*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

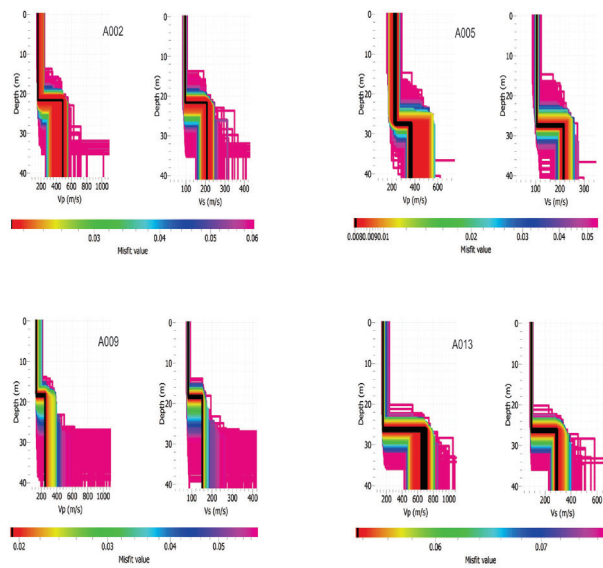
Proses sedimentasi di wilayah pantai utara Demak berlangsung sangat cepat. Rahardjo dan Ramelan (1997) menyatakan bahwa pusat kerajaan Demak pada abad ke 15 berada di kawasan pantai. Adapun kedudukan garis pantai saat ini sudah bergeser ke arah relatif utara sejauh kurang lebih 14 km dari kawasan pusat kota. Hal ini menunjukkan gambaran sedemikian cepat proses sedimentasi di daerah ini. Endapan sedimen yang sangat muda ini tentu belum terkonsolidasi. Keberadaan endapan lunak di kawasan ini dapat menjadi potensi permasalahan tersendiri baik dari aspek daya dukung lahan maupun kebencanaan. Secara teoritis keberadaan endapan lunak ini dapat menguatkan gelombang gempa. Ada beberapa parameter fisis yang berpengaruh terhadap nilai penguatan tersebut, diantaranya kontas kecepatan gelombang geser antara kedua jenis lapisan tersebut, ketebalan endapan lapisan lunak, frekuensi resonan dan faktor kualitas endapan permukaan. Pemodelan kecepatan gelombang geser diperoleh dari inversi kecepatan fase (*phase velocity*) gelombang Rayleigh dengan algoritma SPAC (*spatial autocorrelation*, Okada, 2003 dalam Takai, dkk., 2019).

Hasil pemodelan 1D mikrotremor *array* umumnya menunjukkan kecepatan gelombang geser di sekitar 100 m/detik (Gambar 3). Nilai kecepatan gelombang geser sebesar itu secara fisik merupakan material yang sangat lunak. Hasil pengamatan langsung di lapangan endapan permukaan ini didominasi oleh material lempungan. Adapun lapisan yang mengalasi endapan permukaan dengan kecepatan gelombang geser sekitar 200 m/detik juga masih termasuk kategori endapan lunak. Berdasarkan data pemboran geologi teknik di daerah Gemulak, Sayung (Buana dan Pamungkas, 2016) hingga kedalaman 200 m diinterpretasikan masih merupakan endapan alluvium. Berdasarkan data tersebut, maka lapisan yang mengalasi endapan lunak permukaan ini diduga merupakan fasies yang lebih tua dari endapan alluvium di daerah Demak ini.

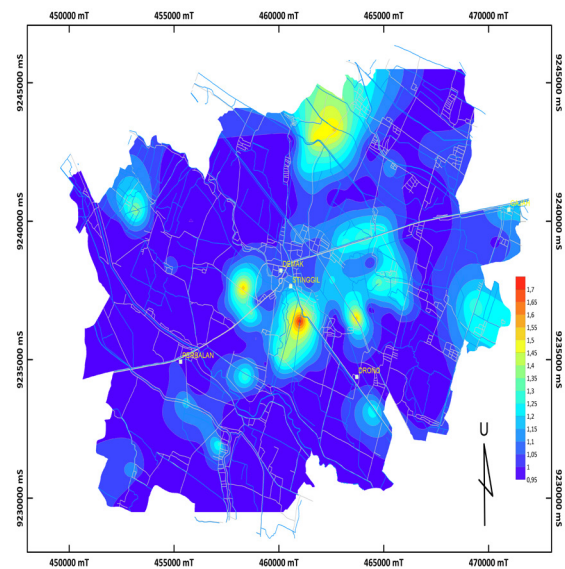
Dalam penyelidikan ini, nilai kontras impedansi didekati dengan nilai kontras kecepatan gelombang geser, karena tidak dilakukan pengukuran rapat massa endapan sedimen permukaan dan lapisan alas. Hasil perhitungan nilai penguatan gelombang seismik untuk seluruh daerah penyelidikan berkisar antara 1,2 hingga 2,0 (Gambar 4). Nilai penguatan gelombang tinggi terdistribusi secara setempat-setempat terutama di bagian tengah dan beberapa lokasi di utara dan timur daerah penyelidikan.

Nilai penguatan gelombang ini menunjukkan tingkat resiko suatu wilayah untuk mengalami guncangan (*ground shaking*) ketika terjadi gempabumi. Zona dengan nilai penguatan tinggi tentu akan mengalami intensitas guncangan yang lebih kuat dibandingkan zona penguatan gelombang rendah. Berdasarkan distribusi nilai penguatan gelombang tersebut selanjutnya dilakukan zonasi untuk menentukan

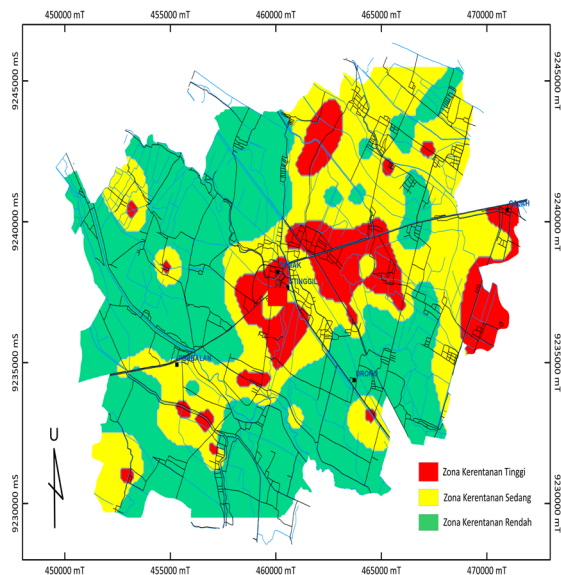
tingkat kerentanan, yakni zona kerentanan tinggi, sedang dan rendah. Tingkat kerentanan ini bersifat relatif, karena dari seluruh luasan daerah penyelidikan dibagi menjadi tiga (3) area yang sama luas untuk zona kerentanan tinggi, sedang dan rendah. Distribusi tingkat kerentanan ini selanjutnya disebut sebagai mikrozonasi seismik (Gambar 5). Karena pembagian tingkat kerentanan didasarkan pada nilai penguatan gelombang seismik, maka distribusi tingkat kerentanan ini juga mirip dengan sebaran tingkat penguatan gelombang. Zona kerentanan tinggi menempati bagian tengah, utara dan timur daerah penyelidikan. Secara setempat-setempat juga menempati di sejumlah lokasi.



Gambar 3. Model kecepatan gelombang P dan S di empat lokasi titik ukur, lapisan permukaan diinterpretasikan sebagai fasies paling muda dari endapan alluvium, sedangkan lapisan kedua merupakan fasies yang lebih tua.



Gambar 4. Sebaran nilai penguatan gelombang seismik daerah Demak dan sekitarnya, zona penguatan tinggi ditunjukkan oleh warna merah.



Gambar 5. Mikrozonasi seismik daerah Demak dan sekitarnya. Daerah kerentanan tinggi, sedang dan rendah ditunjukkan oleh masing-masing warna merah, kuning dan hijau.

Distribusi tingkat kerentanan ini dapat dijadikan dasar dalam rekomendasi penataan ruang wilayah yang diintegrasikan dengan berbagai aspek yang lain, mengingat wilayah ini dekat dengan lajur-lajur struktur geologi aktif. Pengembangan wilayah lebih lanjut di daerah perkotaan Demak direkomendasikan pada zona kerentanan rendah. Daerah dengan tingkat kerentanan tinggi tidak direkomendasikan untuk pembangunan sarana vital seperti: sarana pembangkitan energi, telekomunikasi, air bersih, rumah sakit, layanan pemerintahan, sekolah dan sebagainya. Area-area tersebut direkomendasikan untuk pengembangan sektor-sektor yang beresiko rendah seperti : pertanian, perkebunan, peternakan, kehutanan, taman kota dan sebagainya.

KESIMPULAN

Data geologi baik dari aspek sumber daya, daya dukung dan lingkungan serta kebencanaan mestinya menempati bagian terpenting dalam penataan ruang wilayah, karena menyangkut kebutuhan dasar dari kehidupan. Peruntukan tata guna lahan yang tepat akan menjamin keberlanjutan pembangunan. Daerah Demak dan sekitarnya telah ditetapkan sebagai salah satu Kawasan Strategis Nasional yang akan ditinjau penataan ruangnya setiap lima tahun sekali. Data dasar geologi termasuk di dalamnya aspek kebencanaan perlu dijamin ketersediaannya sebagai bahan reevaluasi penataan ruang wilayah. Hasil penyelidikan tingkat kerentanan daerah Demak dan sekitarnya terhadap bahaya guncangan tanah yang didasarkan dari nilai penguatan gelombang seismik oleh lapisan sedimen permukaan (*site amplification*) menunjukkan tingkat kerentanan tinggi menempati bagian tengah, utara dan timur daerah penyelidikan. Pengembangan wilayah yang menyangkut pembangunan sarana-sarana penting tidak direkomendasikan di zona ini. Pengembangan wilayah untuk daerah ini perlu diarahkan ke sektor-sektor beresiko rendah. Pengembangan wilayah perkotaan lebih lanjut disarankan pada zona-zona kerentanan rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Kepala Pusat Survei Geologi, yang telah mengizinkan tim untuk melakukan penyelidikan di daerah perkotaan Demak, para teknisi yang telah banyak membantu dalam akuisisi data dan teman-teman di Sarana Penyelidikan yang telah membantu menyiapkan peralatan survey.

ACUAN

- Anbazhagan, P, Kumar, A. and Sitharam, T.G., 2011, Amplification from Isoseismal Map and Site Response Analysis, Proceeding of Third Indian Young Geotechnical Engineers Conference (3IYGEC) 25 - 26 March 2011, Indian Geotechnical Society, New Delhi
- Boschi, E., Caserta, A., Conti, C., Di Bona, M., Funicello, R., Malagnini, L., Marra, F., Martines, G., Rovelli, A. and Salvi, V., 1995, "Resonance of Subsurface Sediments: an Unforeseen Complication for Designers of Roman Columns", *Bull. Seism. Soc. Am.*, (85) 320-324
- Buana, T.W. dan Pamungkas, M., 2016. Penyelidikan Bahaya Geologi Teknik Potensi Penurunan Tanah Kabupaten Demak, Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Laporan internal.
- Dimitriu, P. P., C. A. Papaioannou, and N. P. Theodulidis , 1998. EURO-SEISTEST Strong-motion Array Near Thessaloniki, Northern Greece: A Study of Site-effects, *Bull. Seismol. Soc. Am.* (88) 862-873
- Funicello, R., Lombardi, L., Marra, F. and M. Parotto, 1995, Seismic Damage and Geological Heterogeneity in Rome's Colosseum Area: Are They Related?, *Annali di Geofisica*, 38(3) 267-27
- Hakimov, F., Domej, J., Ischuk, A., Reicherter, K., Cauchie, L., and Havenith, H., 2021, Site Amplification Analysis of Dushanbe City Area, Tajikistan to Support Seismic Microzonation, *Geosciences* 2021, Vol.11, p154-181
- Poedjoprajitno, S., Wahyudiono, J. dan Cita, A., 2008, Reaktifitas Sesar Kaligarang, Semarang, *Indonesian Journal on Geoscience*, 3 (3) 129-138

- Prabowo, U.N., Marjiyono, Sismanto, 2016, Amplifikasi dan Atenuasi Gelombang Seismik di Lapisan Sedimen Permukaan, *Jurnal Sciencetech*, (2) 112-116.
- Rahardjo, S., dan Ramelan, W.D., 1997, Kota Demak Sebagai Bandar Dagang di Jalur Sutra, Seri Dokumentasi : Proyek Inventarisasi dan Dokumentasi Sejarah Nasional Direktorat Jenderal Kebudayaan Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Jakarta.
- Rong, M., Fu, L., Wang, Z., Li, Z., Carpenter, S.N., Edward, W., and Lyu, Y., 2017, On the Amplitude Discrepancy of HVSR and Site Amplification from Strong-Motion Observations, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(6) 2873–2884
- Satoh, T., H. Kawase, and S. Matsushima, 2001, Differences Between Site Characteristics Obtained from Microtremors, S-waves, P-waves, and Cudas, *Bull. Seismol. Soc. Am.* (91) 313–334
- Supartoyo, Putranto, E.T. dan Surono, 2006. Katalog Gempabumi Merusak di Indonesia Tahun 1629-2006, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung.
- Suwarti, T. dan Wikarno, R., 1992, *Peta Geologi Lembar Kudus, Jawa Skala 1: 100.000*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Takai, N., Shigefuji, M., Horita, J., Nomoto, S., Maeda, T., Ichianagi, M., Takahashi, H., Yamanaka, H., Chimoto, K., Tsuno, S., Korenaga, M., and Yamada, N., 2019, Cause of Destructive Strong Ground Motion within 1–2 s in Mukawa Town During the 2018 Mw 6.6 Hokkaido Eastern Ibari Earthquake, *Earth, Planets and Space*, (71) 67-78
- Tim Updating Peta Gempa Indonesia, 2017, Kementeria Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
-