

Profiling Kecepatan Gelombang Geser (V_s) Surabaya Berdasarkan Pengolahan Data Mikrotremor

Asmaul Mufida, Bagus Jaya Santosa, Dwa Desa Warnana
Jurusan Fisika, Fakultas IPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: bjs@physics.its.ac.id

Abstrak—Surabaya merupakan daerah dengan kondisi geologi berupa cekungan endapan aluvial dan batu pasir dengan sedimen berupa batu gamping dan lempung, oleh karenanya daerah Surabaya sangat rawan terhadap kerusakan akibat gempa. Selain itu, Surabaya berada dekat dengan lajur sesar Lasem, Lajur sesar Watu Kosek, lajur sesar Grindulu dan Lajur sesar Pasuruan yang memungkinkan terjadinya gempa yang bersumber dari sesar-sesar tersebut. Maka salah satu upaya yang perlu dilakukan untuk mengurangi resiko bencana terhadap bahaya gempabumi di Surabaya adalah memperkirakan bahaya seismik yang mungkin terjadi yaitu mikrozonasi daerah setempat. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengestimasi nilai sebaran kecepatan gelombang S (V_s) bawah permukaan dengan menggunakan data mikrotremor. Analisa dilakukan pada 39 data titik akusisi mikrotremor tanah yang tersebar di wilayah Surabaya. Data diolah dengan metode HVSR untuk mendapatkan kurva HVSR dan nilai frekuensi natural dan amplifikasi. Kurva HVSR tersebut kemudian diinversikan untuk memperoleh sebaran nilai V_s bawah permukaan, kedalaman bedrock, dan V_{S30} . Berdasarkan V_{S30} , wilayah Surabaya diklasifikasi menjadi tipe tanah E yaitu lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai V_s tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 meter, dengan V_s tipe tanah D menyebar pada hampir seluruh wilayah Surabaya terkecuali bagian tengah ke arah barat yang memiliki V_s tipe tanah C.

Kata Kunci—Kecepatan Gelombang S (V_s), Inversi Mikrotremor, HVSR, V_{S30} , Surabaya

I. PENDAHULUAN

Surabaya merupakan daerah dengan kondisi geologi berupa cekungan endapan aluvial dan batu pasir dengan sedimen berupa batu gamping dan lempung [1]. Sedangkan suatu wilayah dengan kondisi geologi berupa endapan aluvial, *tuff* dan batu pasir mempunyai potensi bahaya lebih besar terhadap efek intensitas getaran tanah akibat amplifikasi dan interaksi getaran tanah terhadap bangunan karena gempa bumi [2]. Selain itu, Surabaya berada dekat dengan lajur sesar aktif Lasem, Lajur sesar aktif Watu Kosek, lajur sesar aktif Grindulu dan Lajur sesar aktif Pasuruan sehingga besar kemungkinan wilayah ini bisa terjadi gempabumi yang diakibatkan oleh sesar-sesar tersebut. Untuk itu, penting untuk memperkirakan bahaya seismik yang mungkin terjadi oleh gempabumi untuk mengurangi potensi kerusakan yang diakibatkan oleh gempabumi. Salah satu tahap dasar untuk memperkirakan bahaya seismik yang mungkin terjadi adalah mikrozonasi daerah setempat, yang memberikan analisa bahaya seismik dasar dari daerah setempat serta

memberikan batas-batas wilayah yang rawan terhadap efek lokal.



Gambar 1. Peta Geologi Surabaya (Sukardi, 1992)

Karakteristik dinamik tanah seperti mengestimasi nilai V_s untuk kedalaman tanah dalam multi dimensi secara konvensional digunakan metode geofisika *borehole*, namun membutuhkan biaya lebih mahal serta waktu yang cukup lama untuk dilakukan mikrozonasi seismik, untuk mengestimasi nilai V_s dan estimasi distribusi kerusakan akibat gempabumi [2, 3]. Untuk itu dilakukan observasi mikrotremor yang dapat menampilkan profil tanah bawah permukaan tanpa pengeboran dan dapat digunakan untuk mengestimasi properti dinamik yang diperlukan untuk tujuan yang dimaksud.

Nakamura [4] menunjukkan bahwa mikrotremor rasio spektrum *horizontal-to-vertical* (HVSR) yang dapat ditentukan dengan mudah hanya dengan satu sensor dengan tiga komponen, dapat mengestimasi faktor amplifikasi dari daerah setempat untuk insiden gelombang S secara vertikal, karena HVSR merepresentasikan karakteristik dinamik setempat, sebagaimana didukung oleh Sungkono dan Santosa [5] dan Herak [6]. Untuk itu dengan menggunakan *software* ModelHVSR yang dikembangkan oleh Herak [6] dilakukan

pengolahan inversi kurva HVSR yang berbasis gelombang badan untuk mengestimasi kecepatan gelombang V_s .

Nilai V_s bawah permukaan yang diperoleh dari hasil inversi kurva HVSR tersebut digunakan untuk mengestimasi V_{s30} yang berguna untuk klasifikasi tanah berdasarkan kekuatan getaran gempabumi akibat efek lokal [7]. Dengan demikian sebagaimana diungkapkan oleh Roşer dan Gosar [7] nilai V_{s30} ini dapat dipergunakan untuk memperkirakan bahaya gempabumi dan penentuan standard bangunan tahan gempa.

Hal ini merupakan tahap dasar yang diperlukan untuk mengurangi resiko bencana gempabumi, agar dapat menjadi salah satu tinjauan Pemerintah Daerah dalam mengatur tata ruang dan wilayah dalam pengembangan dan pembangunan yang akan dilakukan ke depannya.

Menurut Tokimatsu [3], mikrotremor atau yang biasa disebut dengan *ambient noise* adalah getaran tanah dengan amplitudo mikrometer yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam ataupun buatan, seperti angin, gelombang laut atau getaran kendaraan yang bisa menggambarkan kondisi geologi suatu wilayah dekat permukaan. Mikrotremor didasarkan pada perekaman *ambient noise* untuk menentukan parameter karakteristik dinamika (*damping ratio* dan frekuensi natural) dan fungsi perpindahan (frekuensi dan amplifikasi) bangunan [2].

Teknik HVSR (*Horizontal to Vertical Fourier Amplitude Spectral Ratio*) pada analisis data mikrotremor telah digunakan secara luas untuk studi efek lokal dan mikrozonasi. Selain sederhana dan bisa dilakukan kapan dan dimana saja, teknik ini juga mampu mengestimasi frekuensi resonansi secara langsung tanpa harus mengetahui struktur kecepatan gelombang geser dan kondisi geologi bawah permukaan lebih dulu. Nakamura *et al.*[2] menyebutkan bahwa metode HVSR untuk analisis mikrotremor bisa digunakan untuk memperoleh frekuensi natural sedimen.

II. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan seperangkat alat mikrotremor *portable* yang terdiri dari alat *Portable Digital Seismograph* 3 komponen (2 komponen horizontal: EW-NS dan 1 komponen vertikal) periode pendek merk Taurus (Canada) dengan jenis sensor *Feedback Short Period Seismometer* tipe DS-4A serta dilengkapi *digitizer (Data logger)*. Pengukuran mikrotremor dilakukan menyebar di daerah Surabaya bagian timur sebanyak 39 titik. Alur penelitian ini secara lebih lengkap bisa dilihat pada gambar 1.

Penelitian diawali dengan mendesain konsep akusisi lapangan, sehingga didapatkan gambaran rinci terkait dengan akusisi yang akan dilakukan. tahap selanjutnya adalah akusisi mikrotremor pada titik akusisi yang telah didesain sebelumnya. Data akusisi dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan frekuensi natural dan nilai amplifikasi. Pengolahan data tersebut digunakan analisis data HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Selanjutnya kurva HVSR hasil analisa HVSR diinversikan untuk mendapatkan nilai V_s yang kemudian digunakan untuk mengestimasi nilai V_{s30} . Nilai V_{s30} bisa ditentukan dari perumusan sebagai berikut :

Tabel 1. Klasifikasi Tanah sesuai dengan *Eurocode 8* [8, 9]

Tipe Tanah	Uraian Gambaran Stratigrafi	V_{s30}
A	Batuan atau formasi batuan lainnya,	> 800
B	Endapan <i>sand</i> atau <i>clay</i> yang sangat padat, <i>gravel</i> , pada ketebalan beberapa puluh meter, ditandai dengan peningkatan sifat mekanik terhadap kedalaman.	360-800
C	Endapan <i>sand</i> padat atau setengah padat yang tebal, <i>gravel</i> atau <i>clay</i> padat dengan ketebalan beberapa puluhan hingga ratusan meter	180-360
D	Endapan tanah kohesi rendah sampai sedang (dengan atau tanpa beberapa lapisan kohesi rendah), atau terutama pada tanah kohesi rendah	< 180
E	Lapisan tanah terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai V_s tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 meter, dibawah tanah ini berupa material keras dengan $V_s > 800$ m/s	
S1	Endapan terdiri dari atau mengandung, ketebalan lapisan minimal 10 m, pada tanah lempung lunak atau lempung lanauan dengan indeks plastisitas dan kadar air yang tinggi.	<100 (indikasi)
S2	Endapan tanah likuifiable, dari clay yang sensitif, atau tanah alain yang tidak termasuk dalam tipe A-E atau S1	

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan h_i dan V_i secara berturut-turut ialah ketebalan (dalam meter) dan kecepatan gelombang geser (*shear strain* sekitar 10-5 atau kurang) setiap lapisan ke-i, N merupakan jumlah lapisan diatas kedalaman 30 meter. Pengklasifikasian hasil estimasi V_{s30} dari inversi HVSR ini didasarkan pada Tabel 1 sebagaimana yang telah dilakukan oleh Roşer dan Gosar [7].

A. Pengolahan Data Mikrotremor Tanah

Seluruh data akusisi diolah menggunakan *software* Geopsy. Data akusisi tanah dianalisis dengan teknik HVSR, yakni rasio amplitude spektrum horizontal dan vertikal dengan persamaan 2 berikut [2]:

$$R(t) = \left[\frac{\sqrt{FNS(T)^2 + FEW^2}}{FZ(T)} \right] \dots\dots\dots (2)$$

dengan $R(T)$, F_{NS} , F_{EW} dan F_z berturut-turut adalah spektrum rasio vertikal terhadap horizontal, spektrum *Fourier* di NS,

spektrum *Fourier* di EW dan spektrum *Fourier* di Z (arah vertikal).

Data mikrotremor tanah pada *software* Geopsy dilakukan pemilihan *windows* yang stasioner antara 20-50 detik *non overlapping*. Kemudian analisis spektrum *Fourier* dilakukan untuk mengubah data awal akusisi yang berupa domain waktu menjadi domain frekuensi. Hasil FFT dilakukan *smoothing* Konno Ohmachi dengan koefisien *bandwith* 40 [10, 11]. Pengolahan dilanjutkan dengan analisis HVSR untuk memperoleh nilai HVSR yang ditunjukkan dengan puncak tertinggi kurva HVSR dianggap sebagai frekuensi natural tanah.

B. Pengolahan Inversi Kurva HVSR

Kurva HVSR diinversikan dengan menggunakan *software* ModelHVSR yang dikembangkan oleh Herak [7], dengan pendekatan kurva HVSR berbasis gelombang badan untuk mendapatkan parameter kecepatan gelombang S (V_S) di titik pengukuran mikrotremor. Sebagaimana dipaparkan oleh Herak [7] dalam pengembangan *software* ModelHVSRnya bahwa kurva HVSR dipengaruhi oleh 6 parameter, yaitu V_S , V_P , Q_S , Q_P , h dan ρ , yang menunjukkan ketidakunikn yang sangat tinggi, sebagaimana dipaparkan pula oleh Dal Moro (2010) pada jurnal Sungkono dan Santosa [5]. Maka untuk mendapatkan nilai V_S yang akurat, diperlukan konstrain saat proses inversi kurva HVSR, dalam hal ini digunakan data bor yang diberikan untuk inialisasi atau input yang dimasukkan saat menginversi. Estimasi V_S dilakukan dengan pendekatan dari data N_{SPT} yang diperoleh dari data bor dengan didasarkan pada beberapa persamaan eksak yang diadopsi dari Akin *et al.* [12] yang mengacu dari peneliti sebelumnya (Shibata (1970), Ohta *et al.* (1972), Ohsaki dan Iwasaki (1973), Imai *et al.* (1977), Seed *et al.* (1983), Syikora dan Stokoe (1983), Raptakis *et al.* (1995), Okomoto *et al.* (1989), Lee (1990), Pitilakis *et al.* (1992), Hasancebi dan Usulay (2007), Hanumantharao and Ramana (2008), Dikmen (2008)).

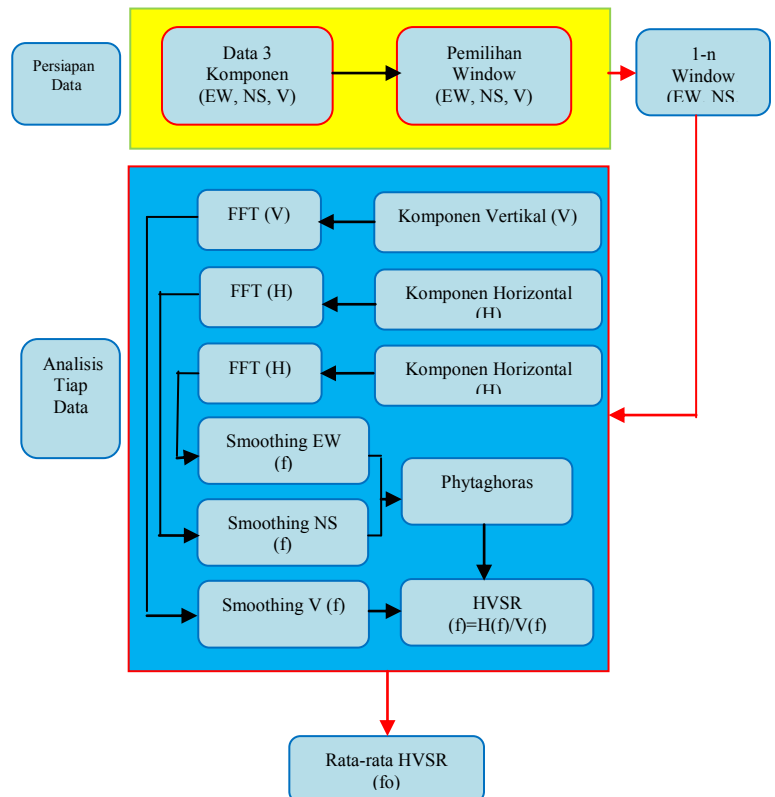
Kemudian ditentukan syarat-syarat batas parameter awal dan parameter inversi. Seperti nilai minimal untuk V_S , V_P/V_S , ρ , h , dan Q_P/Q_S , serta nilai maksimal untuk V_P/V_S , ρ , h , dan Q_P/Q_S .

C. Penentuan V_{S30}

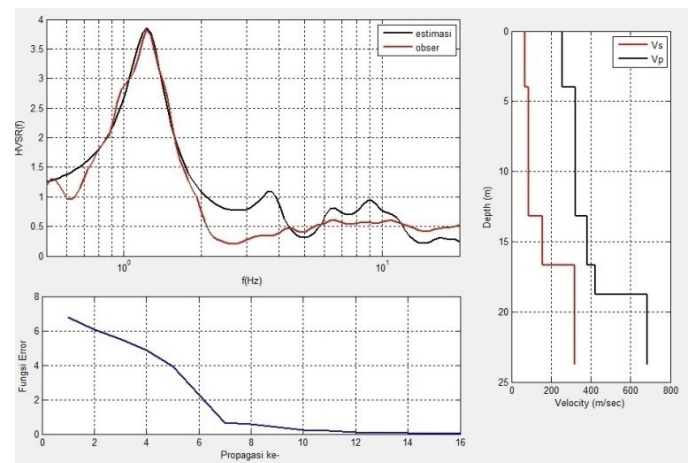
Estimasi V_{S30} dihasilkan dari V_S yang dihasilkan dari inversi kurva HVSR untuk masing-masing titik akusisi data mikrotremor. Estimasi V_{S30} dilakukan dengan menggunakan Persamaan 1. Selanjutnya dengan nilai V_{S30} yang dihasilkan memungkinkan untuk dilakukan klasifikasi tingkat kerentanan tanah daerah Surabaya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari analisis HVSR didapatkan frekuensi natural tanah dan amplifikasi pada 39 titik pengukuran di wilayah Surabaya yang diinversikan untuk mendapatkan nilai V_S , kemudian digunakan untuk menghitung nilai V_{S30} dari wilayah Surabaya. Nilai frekuensi natural tanah berkisar 0.6-4.8 Hz dengan peta frekuensi natural



Gambar 2. Diagram alir analisis kurva HVSR pada pengolahan data mikrotremor tanah. Diawali dengan pemilihan *windows* stasioner pada masing-masing komponen spektrum dan dilakukan analisis spektrum *Fourier*. Untuk menghaluskan hasil FFT, digunakan *filter smoothing* Konno Ohmachi koefisien *bandwith* 40. Terakhir, penggabungan komponen spektrum menggunakan analisis HVSR



Gambar 3. Gambar hasil inversi dengan menggunakan ModelHVSR, grafik yang paling atas sebelah kiri merupakan grafik kurva HVSR dengan garis hitam mewakili grafik HVSR hasil observasi sedangkan garis merah mewakili grafik HVSR hasil estimasi, kemudian grafik sebelah kanan mempresentasikan hubungan *velocity* dan kedalaman (h) dengan garis merah merepresentasikan kecepatan gelombang S (V_S) dan garis hitam merepresentasikan kecepatan gelombang P (V_P), sedangkan grafik terakhir merupakan grafik yang menunjukkan hubungan fungsi eror dan propagasi yang dilakukan.

disajikan dalam Gambar 4. Sehingga bisa diindikasikan bahwa Surabaya merupakan wilayah dengan kondisi geologi berupa endapan sedimen karena memiliki frekuensi natural kecil. Sebagaimana diungkapkan oleh Sukardi [1] bahwa Surabaya secara umum dominan daerah dataran rendah, 80%

wilayahnya merupakan endapan aluvial dan sisanya merupakan perbukitan rendah yang dibentuk oleh tanah hasil pelapukan batuan tersier/tua.

Dari hasil inversi kurva HVSR yang dilakukan telah didapatkan persebaran nilai kecepatan gelombang S (V_S) bawah permukaan pada masing-masing titik akusisi. Dengan berdasarkan kurva HVSR berbasis gelombang badan dilakukan inversi dengan menggunakan *software* ModelHVSR yang dikembangkan oleh Herak [6] sehingga didapatkan nilai sebaran V_S wilayah Surabaya yang digambarkan dalam Gambar 5 yang merupakan gambar 3D sebaran V_S wilayah Surabaya (tampak atas dan dari arah Selatan-Barat (SW) (a) dan arah Utara-Timur (EN) (b)). Dari gradasi warna yang tampak, terlihat bahwa wilayah Surabaya memiliki rata-rata nilai V_S yang rendah, yaitu sekitar 50-300 m/s. Kemudian gambar juga menunjukkan kecepatan gelombang geser rendah (<150 m/s) semakin menebal menuju arah utara dan arah selatan, sedangkan bagian tengah arah barat lapisan dengan V_S rendah tipis. Batas-batas kedalaman V_S ini menunjukkan kedalaman *bedrock* tiap titik. Pada dasarnya *bedrock* struktur bawah permukaan dapat diketahui dari nilai V_S yang tinggi, yakni sekitar 1000 m/s. Namun yang terjadi di wilayah Surabaya ini berbeda, karena *bedrock* yang didapatkan memiliki nilai V_S dibawah 500 m/s hal ini karena memang pada dasarnya hampir seluruh wilayah Surabaya tertutupi oleh endapan permukaan aluvium dan batu pasir, dengan *bedrock* berupa lempung dan konglomerat [6].

Estimasi V_{S30} dihasilkan dari V_S diatas kedalaman 30 meter yang dihasilkan dari inversi kurva HVSR untuk masing-masing titik akusisi data mikrotremor yang kemudian dipetakan dalam Gambar 6. Peta V_{S30} merupakan parameter penting untuk penelitian efek lokal. Dari peta mikrozonasi V_{S30} yang diperoleh serta mengacu berdasarkan Tabel 1 [8, 9] tentang klasifikasi tanah wilayah Surabaya diklasifikasi sebagai tipe tanah E yaitu lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai V_S tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 meter, dengan V_S tipe tanah D menyebar pada hampir seluruh wilayah Surabaya terkecuali bagian tengah ke arah barat yang memiliki V_S tipe tanah C.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa dari peta frekuensi natural, peta amplifikasi, dan peta V_{S30} yang diperoleh menunjukkan bahwa daerah sepanjang Surabaya bagian timur sampai Surabaya bagian utara memiliki nilai frekuensi natural yang rendah, amplifikasi tinggi dan nilai V_{S30} yang rendah, sehingga bisa dikatakan bahwa daerah tersebut merupakan daerah yang rentan terhadap kerusakan akibat gempa. Kemudian dari estimasi V_{S30} yang diperoleh wilayah Surabaya diklasifikasi sebagai tipe tanah E yaitu lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai V_S tipe C Tabel 2 tabel Frekuensi dan Amplifikasi Natural Hasil Analisa atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 meter, dengan V_S tipe tanah D menyebar pada hampir seluruh wilayah Surabaya terkecuali bagian tengah ke arah barat yang memiliki V_S tipe tanah C.

HVSR

Titik	F_0 (Hz)	Amp	T38	1,22278	4,76181
T02	1,22278	2,550171	T39	2,30382	4,31187
T04	2,881	3,92234	T40	1,64743	2,26251
T05	1,4732	4,78009	T41	0,781914	3,98026
T09	1,98481	6,93531	T42	1,22278	2,21357
T11	1,22278	3,82836	T43	1,17806	1,75594
T13	0,699217	4,41591	T45	1,2692	1,9703
T15	0,699217	6,02128	T49	2,5673	3,20074
T19	1,22278	8,43812	T50	1,70998	3,80568
T21	1,3674	3,31211	T51	1,01493	3,30436
T22	1,3674	3,56067	T52	1,942044	3,76364
T25	1,13497	2,20449	T53	1,13497	2,04007
T26	4,18185	2,13286	T58	0,977808	3,00155
T28	3,34306	2,00059	T60	1,01493	3,09175
T30	1,05346	7,32342	T62	1,13497	3,92053
T31	1,84228	2,94639	T63	0,842411	3,95549
T32	1,2692	3,06055	T68	1,01493	3,57057
T34	4,85398	2,72854	T70	1,09345	3,75468
T35	4,02889	3,55483	T71	0,977808	3,49425
T37	1,22278	2,48843	T72	1,05346	2,75464

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada ketua jurusan Fisika Dr. Yono Hadi Pramono M. Eng, seluruh dosen jurusan Fisika, Sungkono, M.Si., Ary Istiadi, S.Si, Septa Erik Prabawa, S.Si, dan keluarga besar laboratorium Geofisika yang telah memberikan bimbingan dan dukungan kepada penulis.

DAFTAR PUSTAKA

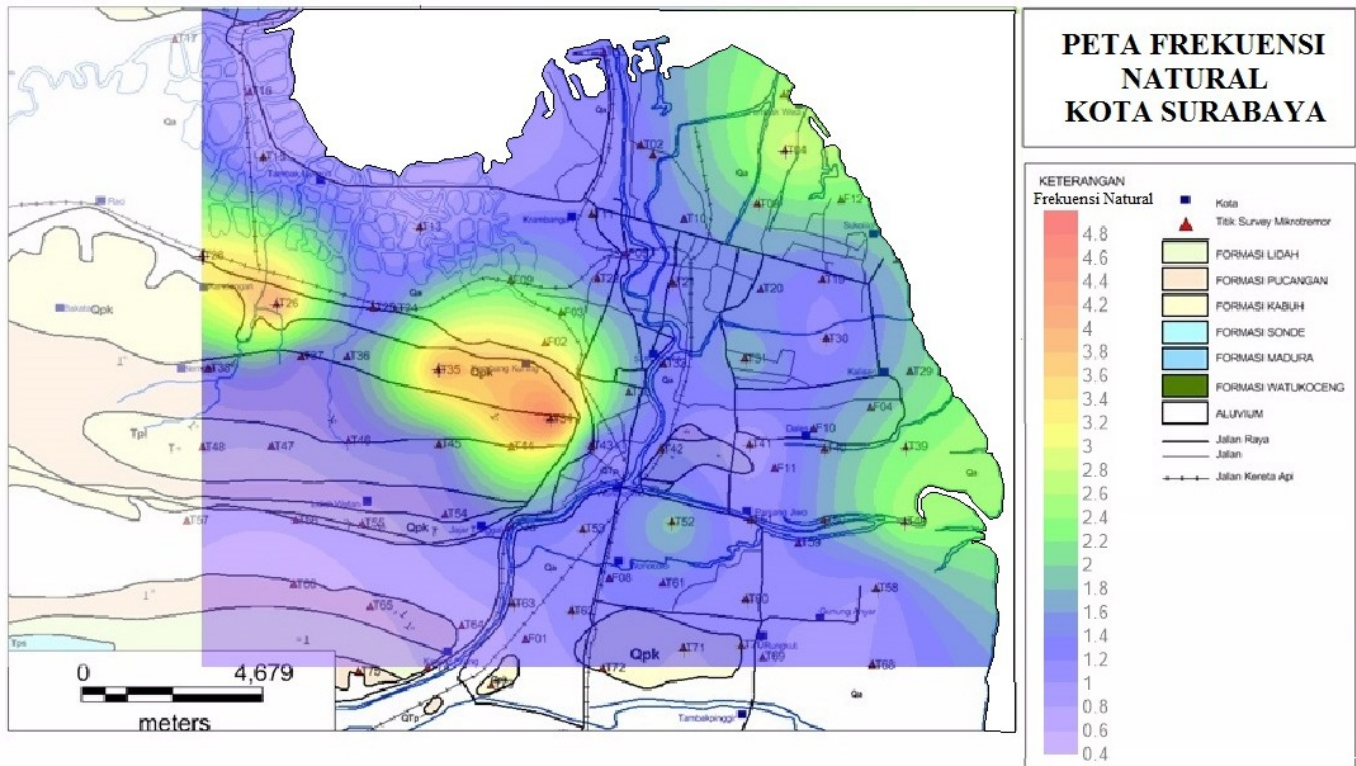
- [1] Sukardi. 1992. *Geologi Lembar Surabaya & Sapulu, Jawa. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- [2] Nakamura, Y. Gurler, Dilek, E. Saita, Jun. Rovelli, Antonio. Donati, Stefano. 2000. *Vulnerability Investigation of Roman Colosseum Using Microtremor*. 12WCEE.
- [3] Arai, H., Tokimatsu, K., 2004. *S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor H/V spectrum*. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(1), 54-63.
- [4] Nakamura Y, 1989, *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, Quarterly Report of the Railway Technology Research Institute, Japan ;30(1):25-33.
- [5] Sungkono, B., J., Santosa. 2011. *Karakterisasi Kurva Horizontal-to-Vertical Ratio: Kajian Literatur dan Permodelan*. Submit to Neutrino Journal
- [6] Herak, M. 2008. *ModelHVSR: a Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise*. Computers and Geosciences 34, 1514-1526.
- [7] Rošer, J. and Gosar, A. 2010. *Determination of V_{S30} for seismic ground classifications in the Ljubljana area*. Slovenia. Acta Geotechnica Slovenia.
- [8] CEN (2004). *Eurocode 8—design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European standard EN 1998-1*. December 2004. European Committee for Standardization. Brussels
- [9] SIST EN 1998-1:2005/oA101 (2005). *Eurocode 8, design of structures for earthquake resistance – part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. national Annex. Slovenian institute for standarization, Ljubljana.
- [10] SESAME., 2004. *Guidelines fr the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations: Measurements*,

Processing and Interpretation. http://sesame.fp5.obs.ujf.fr/Delivrables/Del%1ED23%1EHV_user_guidelines.pdf, 62 pp.

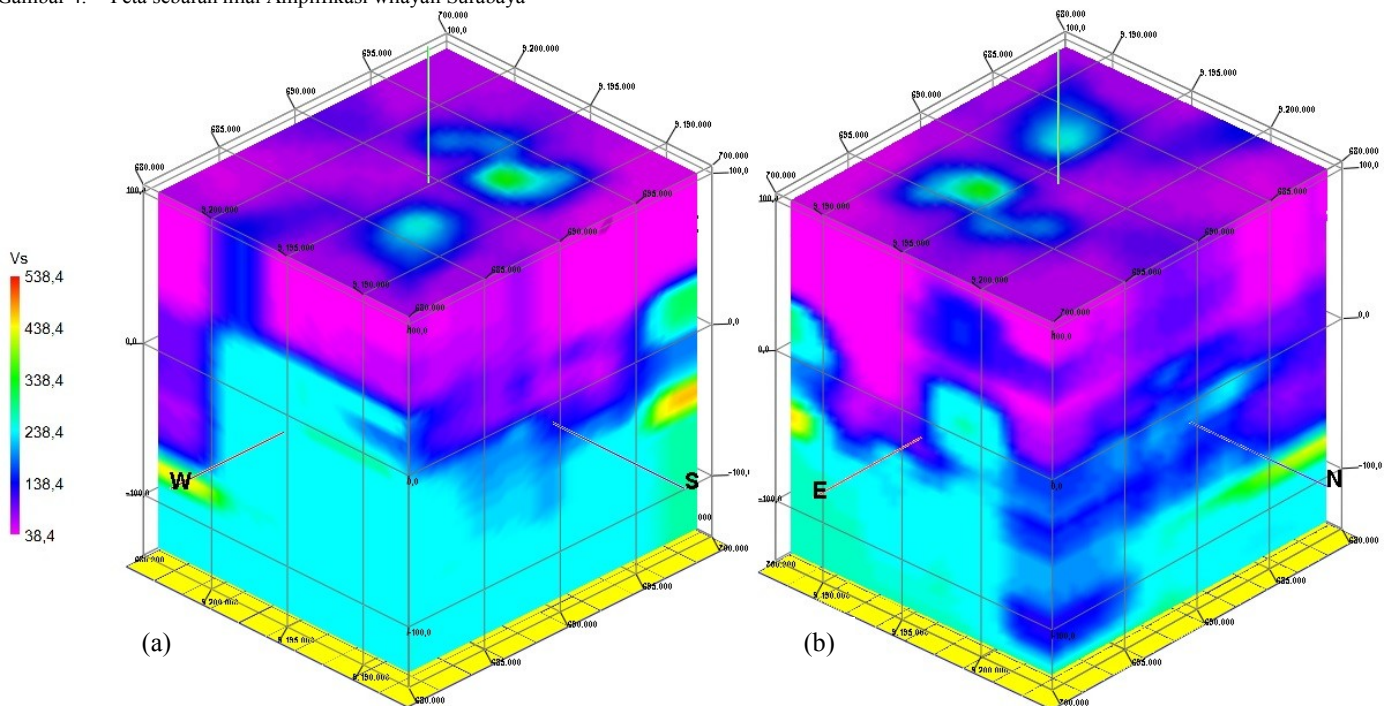
[11] Konno, Katsuaki, Ohmachi, Tatsuo. 1998. *Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor.* Bulletin of the

Seismological Society of America, Vol. 88, No.1, pp. 228-241, February 1998

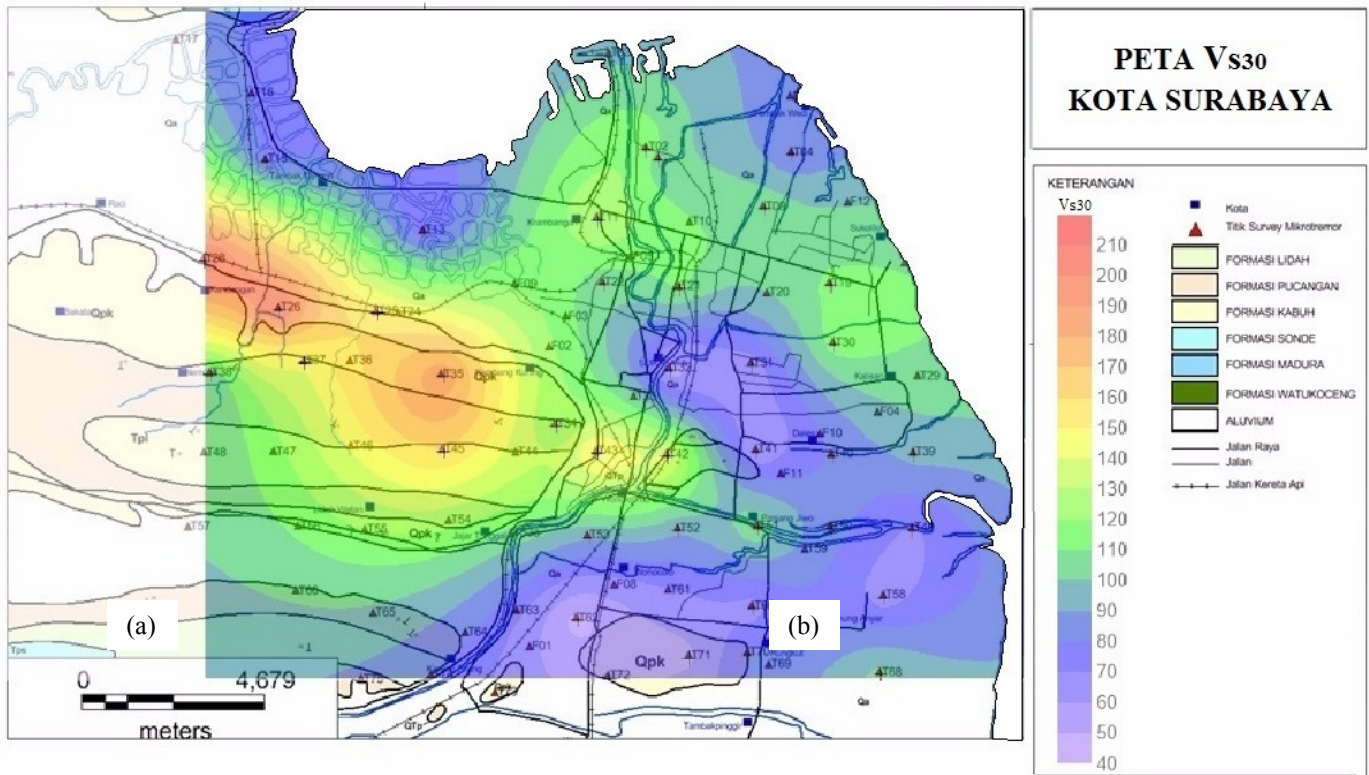
[12] Akin, M. K., Kramer, S.L., Topal, T. 2011. *Empirical correlations of shear wave velocity (Vs) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey).* Engineering Geology 119, pp. 1-17



Gambar 4. Peta sebaran nilai Amplifikasi wilayah Surabaya



Gambar 5. Peta 3 dimensi sebaran nilai V_s wilayah Surabaya dilihat dari arah SW atas (a) dan dilihat dari arah EN atas (b)



Gambar 6. Peta sebaran nilai Vs30 wilayah Surabaya