

PENGUKURAN GETARAN MEKANIK PADA DAERAH PERMUKIMAN AKIBAT KONSTRUKSI PEMBANGUNAN BENDUNGAN SABO-MAGELANG DENGAN STANDARD BS6472-2:2008

MEASUREMENT OF MECHANICAL VIBRATIONS IN RESIDENTIAL AREAS DUE TO THE CONSTRUCTION OF THE SABO-MAGELANG DAM WITH STANDARD BS 6472-2:2008

Hari H. Santoso

Pusat Penelitian Metrologi LIPI, Kompleks Puspiptek Serpong Gedung 420, Tangerang, Banten
harihadi66@yahoo.com

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian tentang pengukuran rambatan getar mekanik yang bersumber dari beroperasinya peralatan konstruksi di lokasi pembangunan Bendungan Sabo. Penelitian ini menggunakan *seismic accelerometer* tiga dimensi sebagai sensor getar dan hasilnya dianalisis dengan *open source* Toolbox dari fungsi Matlab, pengukuran menggunakan standard BS6472-2:2008, dan PPRI Nomor 36 Tahun 2005 tentang Bangunan Gedung. Hasil pengukuran dinyatakan dalam *Peak Particle Velocity* (PPV mm/second) dan menunjukkan daerah paparan getar tercatat pada jarak 50 meter dari sumber getar maksimum hanya 8,1 mm/second dan pada jarak 200 meter dari sumber getar hanya 0,12 mm/second, sedangkan yang disarankan dalam standard BS6472-2:2008 pada jarak 200 meter pada frekuensi 1–80Hz maksimum level disebutkan 0,2 mm/second sampai 0,4 mm/second.

Kata kunci: *seismic accelerometer, standard bs6472-2:2008, peak partikel velocity.*

ABSTRACT

The research has been conducted at the measurement of the mechanical vibrating propagation origin from the operation of construction equipment at locations Sabo Dam Constructions. This study used a three-dimensional seismic accelerometer as vibration sensor and its results are analyzed with the open source Toolbox of Matlab function, measurement reference using standard BS6472-2:2008 and Indonesia's Government Regulation Number 36, 2005 about Building Constructions. The measurement results were presented in Peak Particle Velocity (PPV mm/second) and indicated the exposure area vibrates recorded at a distance of 50 meters from the source of vibrates maximum of only 8.1 mm/second and at a distance of 200 meters from the source of vibrates just 0.12 mm/second, while recommended in standard BS6472-2:2008 at a distance of 200 meters at a maximum frequency of 1–80Hz mentioned level 0.2–0.4 mm/second.

Keywords: *seismic accelerometer, standard bs6472-2:2008, peak partikel velocity.*

1. PENDAHULUAN

Proyek konstruksi pembangunan jembatan, bangunan tinggi, bendungan, dan sabo dam banyak menggunakan alat-alat berat yang berfungsi untuk menggali, meratakan, dan mengangkut material konstruksi. Kegiatan operasi alat berat seperti *excavator, dozer, impact pile driver, vibratory pile hammer, mounted hammer hoe ramp*, dan lain-lain menghasilkan getaran mekanik yang merambat ke segala arah dengan laju rambatan melalui media tanah dan energi getarannya dapat memengaruhi perubahan

struktur ikatan tanah, perubahan konstruksi struktur bangunan dan konstruksi struktur fasilitas umum.^[1–3] Untuk itu, diperlukan penelitian dan pengukuran serta pembuatan peta daerah paparan rambatan getaran mekanik yang bersumber dari proses konstruksi proyek.^[4–6]

Apabila dosis paparan getar mekanik yang diterima struktur bangunan dan struktur lapisan tanah melebihi batas ambang, akan terjadi perubahan struktur konstruksi bangunan dan mengubah struktur kesetimbangan posisi lapisan tanah sedemikian hingga menyebabkan retaknya

bangunan dan runtuhnya lapisan tanah. Selain itu, data daerah paparan getar terjauh diperlukan untuk menentukan lokasi sensor getar yang digunakan untuk deteksi aliran lahar dingin.^[2,6] Lokasi dan posisi bebas paparan getar akibat sumber getar yang berasal dari alat berat yang beroperasi dalam proyek konstruksi diperlukan sebagai salah satu syarat lokasi pemasangan sensor getar karena titik deteksi sensor getar harus tidak terpengaruh oleh getaran mekanik yang merambat dari sumber getar lain. Selain getaran akibat pergerakan aliran lahar dingin, getaran mekanik yang merambat di tanah tersebut biasanya berasal dari alat-alat berat untuk konstruksi, truk, atau alat transportasi angkutan pasir karena sensor getar akan menerima sinyal getar palsu dan berakibat mengaktifkan alarm peringatan dini banjir lahar.^[6]

Hasil pengukuran dan pemetaan pada penelitian ini akan digunakan untuk menentukan lokasi pemasangan sensor getar peringatan dini datangnya banjir lahar dan menghasilkan nilai jarak aman untuk bangunan di pemukiman dan fasilitas umum yang ada dari paparan getaran (daerah zona paparan getar konstruksi).

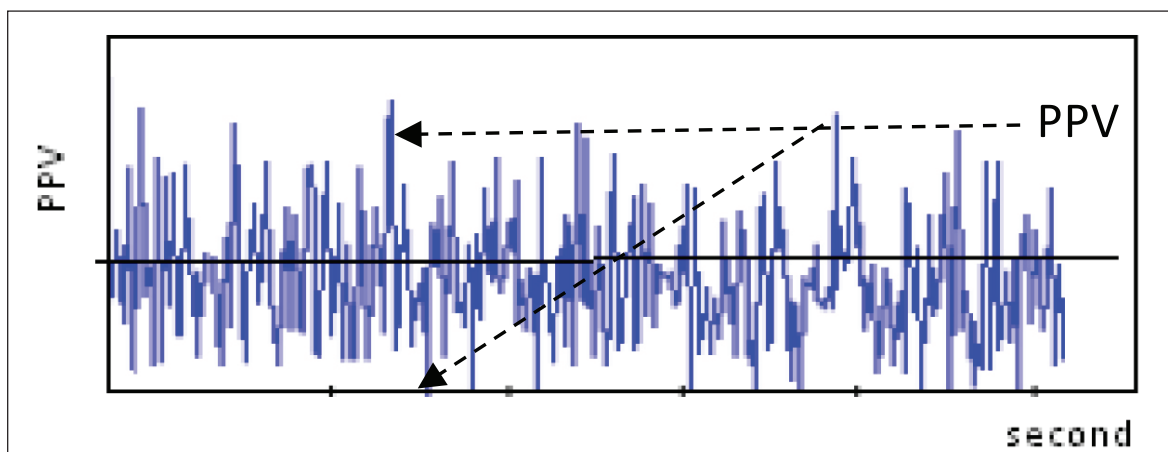
Dasar dan referensi pengukuran digunakan BS 7385-2:1993; BS 5228-4:1992; BS6472-2:2008; BS6841 dan ENV 1993-5.^[7-9]

2. TINJAUAN PUSTAKA

Gelombang Rayleigh (*ground roll*) adalah gelombang yang dikenal sebagai gelombang permukaan yang dihasilkan tekanan sesaat di permukaan tanah yang terjadi akibat adanya

benturan dan interferensi antara gelombang tekan dan gelombang geser secara konstruktif. Gerakan partikel pada muka Gelombang Rayleigh terdiri atas gelombang P dan gelombang S pada bidang horizontal. Karakteristik yang lain dari Gelombang Rayleigh adalah amplitudonya berkurang secara eksponensial terhadap kedalaman yang dilaluinya, sedangkan di permukaan amplitudonya hampir tidak berpengaruh terhadap atenuasinya, mempunyai frekuensi rendah dengan spektrum tidak begitu tajam. Pergerakan Gelombang Rayleigh yang menyebar berbentuk elipsoidal dengan dispersi frekuensi merupakan fungsi frekuensi terhadap kecepatan dan panjang gelombangnya yang tidak dipengaruhi oleh adanya perubahan media padat yang dilaluinya.^[1] Sifat Gelombang Rayleigh mempunyai efek yang sangat kuat apabila kekuatan pemicunya diterapkan di permukaan tanah, energinya mencapai 67% dari energi total yang dihasilkan oleh pemicunya. Oleh karena itu, Gelombang Rayleigh sangat baik digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur berbagai masalah getaran yang merambat di tanah karena pengurangan energi dalam perambatannya lebih rendah daripada jenis gelombang lain.^[3]

Sinyal percepatan partikel yang diterima empat buah *seismic accelerometer* (m/second^2) pada jarak $y_1(50\text{m})$, $y_2(100\text{m})$, $y_3(150\text{m})$ dan $y_4(200\text{m})$ dengan waktu tiba sebesar dt sebagai kecepatan partikel Gelombang Rayleigh. Data signal dalam domain waktu $y_1(t)$, $y_2(t)$, ..., $y_4(t)$ dengan menggunakan Toolbox FFT pada Matlab Function diubah menjadi domain frekuensi $y_1(f)$, $y_2(f)$, ..., $y_4(f)$.



Gambar 1. Ilustrasi Umum *Peak Partikel Velocity*^[8]

Satuan dari kecepatan puncak partikel getaran yang merambat di tanah dinyatakan dalam *Peak Partikel Velocity* (PPV) dengan satuan mm/second adalah harga puncak amplitudo maksimum atau minimum sinyal getaran dari kecepatan osilasi getar sebuah muka gelombang (*wave front*) yang dihasilkan oleh pergerakan dan operasinya alat-alat berat dalam pekerjaan konstruksi pembuatan bendungan atau sabo dam. Umumnya, satuan ini digunakan untuk mengukur harga potensi kerusakan sebuah konstruksi dan struktur tanah yang terpapar jika dinyatakan dalam bentuk persamaan matematik adalah sebagai berikut.

$$PPV = 2.3,142857fd \text{ m/second} \dots\dots\dots(1)^{[2]}$$

Dengan

f adalah frekuensi getaran (Hz)

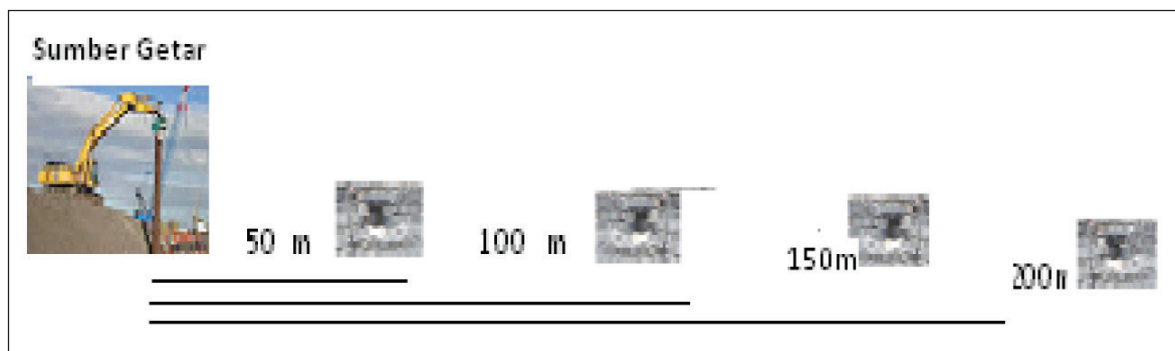
d adalah tinggi lompatan material pada permukaan datar, atau simpangan getar

Osilasi getaran yang merambat di tanah menghasilkan getaran yang dapat dirasakan dengan bergetarnya lantai bangunan dan dapat dilihat dengan bergetarnya kaca-kaca jendela, bergerakaknya lampu dan benda-benda yang tergantung di langit-langit bangunan. Pada keadaan ekstrem, ini dapat menyebabkan retaknya struktur dan dinding bangunan atau berubahnya titik kesetimbangan endapan lava jika proyek konstruksi berada di daerah lembah atau kaki pegunungan (Tokita 1983). Umumnya, fase perataan dan penggalian adalah 2 fase konstruksi yang menghasilkan getaran dengan nilai yang cukup tinggi untuk diperhatikan, terutama yang berhubungan dengan operasinya alat berat.^[4,5]

Nilai energi rambatan getaran diperlukan pula untuk mengetahui paparan energi getar yang merambat di tanah yang boleh diterima bangunan di sekitar proyek pembangunan menurut standar bangunan di Indonesia dengan referensi PP RI Nomor 36 Tahun 2005 tentang Bangunan Gedung,^[14] *American National Standard Institute Guide to the Evaluation of Human exposure to vibration in Buildings ANSI S3.29-1983*, kemudian diadopsi menjadi *International organization of standardization (ISO 26312-1989) Evaluation of human exposure of whole body vibration part 2: Continuous and shock induced vibration in building (1–80Hz)* dan direvisi pada tahun 2003 menjadi *ISO 2631-22003 Mechanical vibration and shock: Evaluation of human exposure of whole body vibration: part 2-Vibration in Buildings (1–80 Hz)*.

Standar maksimum yang diperkenankan untuk kurva 1 pada frekuensi 10 Hz sampai 80 Hz pada lampiran 1 dan gambar 2 dinilai pengukuran PPV yang disyaratkan untuk sumbu z 0,41 mm/second dan pada sumbu x, y pada gambar 4 disarankan pada frekuensi 4 Hz sampai dengan 80 Hz yang diperkenankan 0,42 mm/second.^[8,11]

Perlu disadari bahwa pekerjaan pemadatan tanah dan penggalian atau perataan permukaan tanah juga menimbulkan efek samping, yaitu suara dan getaran. Untuk itu, perlu diadakan pengukuran getaran yang merambat untukantisipasi sebaik-baiknya meminimalkan dampaknya. Dari data grafik Gelombang Rayleigh berdasarkan perhitungan Menard,^[8] kemudian dikembangkan oleh Rosyidi dkk. (2002, 2003,



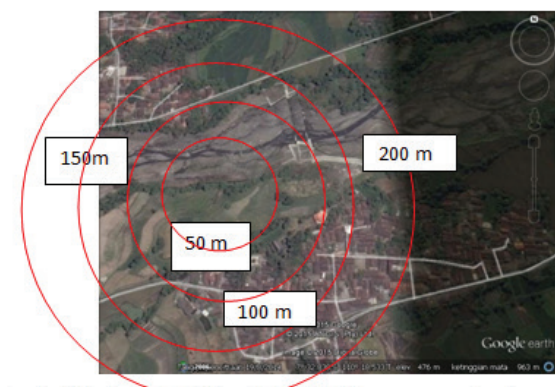
Gambar 2. *Set Up* Sensor Getar di Lokasi Pengukuran

2004) dari energi benturan yang dihasilkan dapat dilihat kecepatan rambat permukaan terhadap jarak dari titik benturan. Besaran kecepatan permukaan inilah yang dapat memengaruhi seberapa besar efek yang bakal diterima oleh suatu bangunan/struktur yang sudah berdiri.^[3,12-13] Untuk pengujian benturan yang dilakukan, kita ambil contoh penggunaan *energy tamping* sebesar 300 t.m, menghasilkan kecepatan getar $V = 10 \text{ mm/second}$ pada jarak 27 m dari titik tamping. Angka $V = 10 \text{ mm/second}$ ini adalah angka aman untuk kriteria energi yang dipakai berbanding sifat tanah dan efisiensi pekerjaan nantinya.

3. LOKASI DAN METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengukur nilai getaran yang ditimbulkan oleh alat berat yang dipergunakan untuk pemadatan, penggalian, pemasangan paku bumi (*pilling*), dan pengangkutan bahan konstruksi yang digunakan untuk pembangunan bendungan sabo sebagai pengelak banjir lahar. *Seismic accelerometer* dipasang pada jarak 50 m, 100 m, 150 m, dan 200 m dari pusat kegiatan konstruksi. Lokasi penelitian di konstruksi pembangunan sabo dam di Sungai Senowo, Desa Mangunsuko, Kecamatan Dukun, Kabupaten Magelang, pada bulan Agustus 2010.

Pusat kegiatan konstruksi berada pada jarak 150 m dari permukiman di sisi kanan maupun sisi kiri di bantaran sungai dengan kiri-kanan berbentuk dinding tebing berketegingian rata-rata 3 m dari dasar sungai.

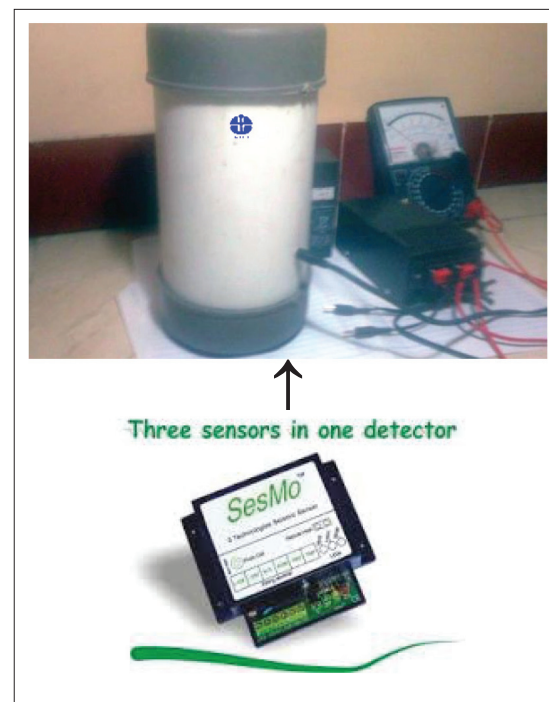


Gambar 3. Lokasi Penelitian dan Peletakan Sensor *Seismic Accelerometer*.

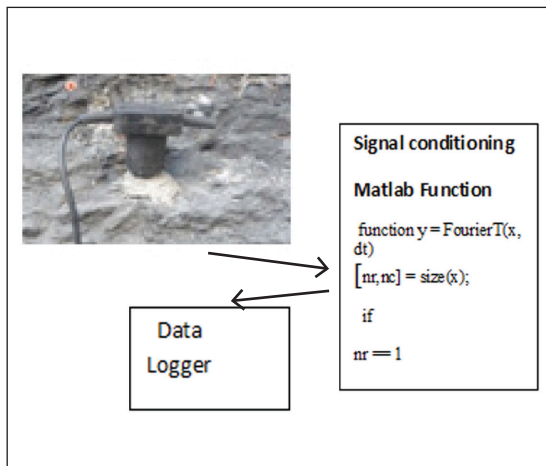
Batuan penyusun daerah lokasi penelitian terdiri dari batuan sedimen, batuan gunung api, batuan beku terobosan, dan endapan aluvial. Batuan sedimen merupakan Formasi Andesit Tua yang terdiri dari Breksi, Andesit, Tufa, Tufa Lapili, Aglomorat, dan Lava Andesit.^[9]

Batuan ini mengandung potensi bahan galian golongan C (berupa batuan andesit). Batuan gunung api merupakan material batuan yang dihasilkan oleh Gunung Api Merapi, Gunung Api Merbabu, dan Gunung Api Sumbing menempati satuan geomorfik lereng dan puncak gunung api tersebut terdiri dari breksi piroklastik, lelehan lava, batu pasi tufaan dan lahar,^[9] untuk itu pengukuran pemasangan sensor getar di posisi 50 m, 100 m, 150 m, dan 200 m.

Sensor getar berupa *seismic accelerometer* 3 dimensi yang dimasukkan ke dalam tabung PVC dengan bantalan pasir sedemikian hingga badan sensor tetap stabil saat menerima sinyal getar dari dasar bidang pengukuran. *Set up instrument* berupa sensor getar akselerometer dengan rentang ukur frekuensi vertikal 4 Hz sampai dengan 700 Hz, sedangkan frekuensi horizontal 1 Hz sampai 700 Hz, dengan *analog output* maksimum 3,3 mvolt DC, dengan respons



Gambar 4. Sensor Getar Tiga Dimensi dalam Pengujian

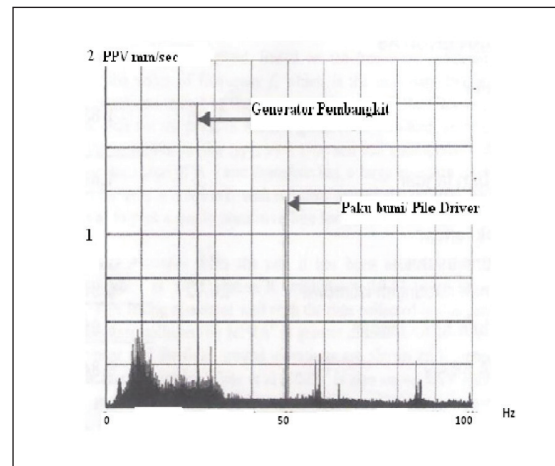


Gambar 5. Set up instrument Pengukuran Getaran pada Saat Konstruksi

percepatan 0,03 G sensitivitasnya 1,2 V/G, *shock limit* 0,5 m/second setengah gelombang sinus.

Sebagai pengolah data digunakan fungsi matlab *toolbox* versi *open source* *vibra toolbox*, signal percepatan yang diterima dari 4 buah akselerometer (m/second²) digunakan untuk menentukan nilai kecepatan partikel dengan memperhitungkan perbedaan waktu (dt) yang diterima sensor *seismic accelerometer* dalam satu *line*. Data-data dari 4 buah sensor dalam domain waktu $y_1(t), y_2(t) \dots y_4(t)$ diubah dalam domain frekuensi dengan menggunakan matlab *toolbox* versi *open source* *vibra* untuk memperoleh persamaan gelombang $y_1(f), y_2(f) \dots y_4(f)$. Proses ini selanjutnya didapatkan grafik perbandingan amplitudo dan frekuensi dari profil kecepatan partikel dalam PPV m/second di permukaan tanah yang menjadi media getar.

Tahapan selanjutnya diperlukan kurva dispersi Gelombang Rayleigh untuk mendapatkan bilangan kompleks yang terdiri atas bilangan nyata berupa amplitudo dan bilangan imajiner berupa fasenya. Dari persamaan dispersi dapat diperoleh kecepatan partikel (PPV) dengan waktu *delay* (dt) dari fase gelombang di antara titik awal sumber sampai titik ukur ke sensor *seismic accelerometer* pertama 50 m, 100 m, 150 m dan 200 m. Besarnya pengolah data versi ini cukup untuk memproses data getaran tiga dimensi yang di-*entry* secara daring dengan USB port dan disimpan dalam *data logger* komputer jinjing.



Gambar 6. Nilai PPV yang Terukur pada Jarak 50 m untuk Generator dan Paku Bumi di Lokasi Penelitian.

4. HASIL PENGUKURAN DAN PEMBAHASAN

Pada saat pengukuran kegiatan konstruksi yang ada hanya beberapa *dump truck* yang beroperasi memindahkan material, *Impact Pile Driver*, *Jackhammer*, dan *mounted hammer hoe ramp*.

Kondisi formasi media rambat gelombang Rayleigh yang akan diukur berupa formasi batuan dan pasir vulkanik, kondisi ini tidak berpengaruh besar terhadap kualitas energi rambatan gelombang Rayleigh yang terukur.^[13]

Pada Gambar 6, hasil pengukuran pada jarak 50 m di frekuensi 1–100 Hz mendapatkan nilai pengukuran PPV, untuk generator pembangkit listrik pada frekuensi 25 Hz adalah 1,8 mm/second, untuk paku bumi pada frekuensi 50 Hz didapatkan nilai PPV sebesar 1,18 mm/second.

Hasil pengukuran untuk *dump truck* yang bergerak melintas lokasi proyek dengan beban penuh batu dan pasir pada jarak 50 meter dari sensor seismik diperoleh level pengukuran PPV-nya rata-rata 0,8 mm/second pada frekuensi 50 Hz, sedangkan nilai akselerasinya yang tercatat 0,03 g. Sampling data getaran dilakukan setelah 300 detik pertama dan sampling data yang diambil untuk proses di Matlab diambil sepanjang 500 detik dan hasil pengukurannya disajikan dalam domain waktu pada Gambar 7 berikut. Setelah diolah dengan FFT, diperoleh spektrum dalam domain frekuensi seperti pada Gambar 7a. Level PPV yang diperoleh 0,08 mm/second pada frekuensi 50 Hz.

Gambar 8 merupakan hasil pengukuran untuk *pile hammer* pada jarak 50 m. Akselerasi dari domain waktu diubah ke domain frekuensi dan hasilnya terukur dua frekuensi getar pada frekuensi 20 Hz dan 50 Hz. Frekuensi getar 20 Hz disebabkan pergerakan *hammer* ketika jatuh yang pertama ke arah *pile* sebagai landasan awal, sedangkan frekuensi kedua ketika *hammer* menekan *pile* masuk ke tanah lebih dalam dengan tekanan 30 kN diperoleh level sebesar 0,08 g, pada frekuensi 50 Hz diperoleh nilai PPV sebesar 1,2 mm/second, ketika *hammer engine* menekan *pile* ke dalam tanah.^[7]

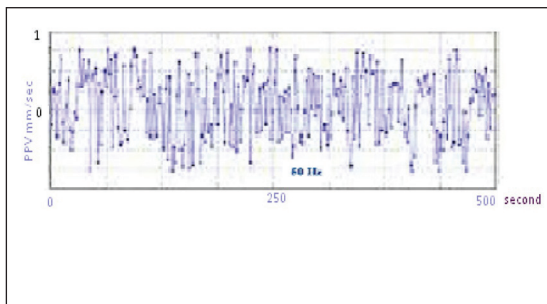
Profil ekskavator yang berfungsi memindahkan, menggali, dan mendorong material galian pada lokasi konstruksi mempunyai pola getar yang berbeda dan spesifik sekali. Hasil pengukuran pada saat ekskavator mengambil material menghasilkan PPV yang lebih kecil dibandingkan pada saat menuangkan material ke *dump truck* pada frekuensi yang sama. Nilai PPV yang terukur pada saat penuangan antara 1 mm/second sampai 1,8 mm/second, dengan frekuensi 30 Hz. Hal ini disebabkan material yang jatuh dan masuk ke dalam bak

truk mengakibatkan terjadi atenuasi amplitudo getarannya.

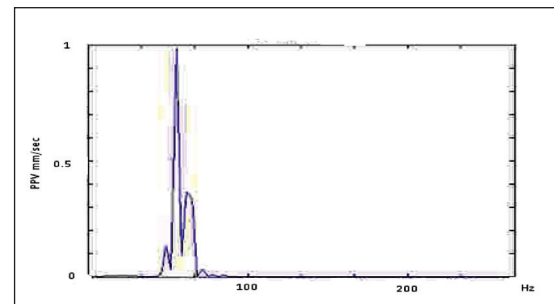
Spektrum getar dari ekskavator yang diterima sensor pada jarak 50 m setelah diproses dengan FFT, hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9, puncak getaran untuk ekskavator yang beroperasi mengambil material dan menuangkan material menghasilkan dua puncak yang berbeda. Frekuensi yang pertama terdeteksi pada saat pengambilan dan penggalian material batu, kerikil, dan pasir diterima pada level PPV 0,08 m/second dan frekuensi pada 30 Hz, sedangkan pada saat penuangan 0,15 mm/second pada frekuensi yang berbeda, yaitu 50 Hz.

Tabel 1 merupakan hasil pengukuran yang dinyatakan dalam PPV dengan paparan empat jam kerja dengan keadaan peralatan konstruksi beroperasi tidak bersamaan. Sampling data dilakukan setelah 600 detik pertama dan selanjutnya setiap 1.200 detik, data sampling diambil sepanjang 300 detik untuk analisis proses FFT dengan menggunakan Matlab, sedangkan hasilnya disajikan dalam Tabel 1.^[4,11,12]

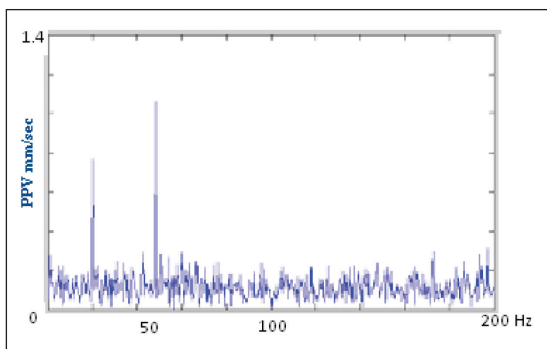
Ketika *mounted hammer hoe ram* beroperasi untuk demolisi pada jarak 50 m, sensor getar



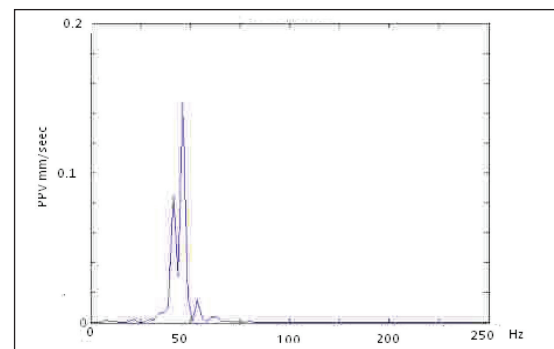
Gambar 7. Spektrum Getaran Fungsi Waktu dari *Dump Truck* yang Diperoleh dari Akselerometer pada Jarak 50 Meter.



Gambar 7a. Hasil Pengolahan FFT dari Sampling Spektrum Getaran Selama 500 detik



Gambar 8. Grafik Getaran Pile Hammer pada Jarak 50 m dengan Frekuensi 50 Hz



Gambar 9. Hasil Pengukuran Level PPV dari Ekskavator

Tabel 1. Hasil Pengukuran PPV dengan Paparan Empat Jam pada Frekuensi 50Hz di Lokasi Penelitian.

Peralatan	Posisi Akselerometer dari sumber getar (m)	Level getar (g)	Level Max(mm/sec-ond)
<i>Mounted Hammer Hoe Ram (demolition)</i>	50	1	8,1
	150	0,03	0,124
	200	-	-
<i>Impact Hammer (pile driving)</i>	50	0,97	7,9
	150	0,07	0,102
<i>Dump Truck</i>	50	0,04	0,0254

Tabel 2. Hasil Pengukuran PPV dengan Paparan Tiga Jam pada Frekuensi 50 Hz di Lokasi Penelitian

Peralatan	Posisi Akselerometer dari sumber getar m)	Level Getar (g)	Level Max (mm/second)
Ekskavator	50	0,03	0,2497
	200	0,01	0,0012
Vibratory Pile Driver	50	1	3,556
	100	0,4	0,876
	200	0,2	0,12
Front end loader	50	0,3	0,2794
	100	0,3	0,09432

menghasilkan akselerasi sebesar 1 g pada level 8,1 mm/second, sedangkan pada jarak 150 m menghasilkan akselerasi sebesar 0,03 g dan levelnya 0,124 mm/second. Sensor getar pada jarak 200 m sama sekali tak terukur. Impact Hammer menghasilkan level 7, 9 mm/second pada jarak 50 meter dari sensor getar, pada jarak 150 meter akselerometer menghasilkan akselerasi 0,07 g pada level 0,102 mm/second, *dump truck* pada saat berjalan dengan membawa material pada jarak 50 m dari sensor getar menghasilkan akselerasi 0,04 g pada level 0,0254 mm/second, sedangkan alat-alat yang lain sangat rendah level PPV-nya atau tidak menerima sinyal getar, sedangkan lokasi pemukiman yang terdekat pada jarak 250 m dari kegiatan proyek konstruksi benar-benar berada di luar paparan getar akibat proyek konstruksi yang sedang berlangsung.

Tabel 2 menggambarkan hasil pengukuran selama paparan tiga jam spektrum yang dihasilkan untuk sampling data diambil setelah 600 detik pertama dan setiap 1.200 detik dilakukan pengambilan sampling sepanjang 300 detik. Hasil sampling proses data yang digunakan sepanjang 300 detik untuk tiga alat konstruksi

getaran maksimum pada jarak 200 meter dari lokasi proyek hanya terdeteksi untuk getaran yang bersumber dari mesin ekskavator dan *Vibrator Pile Driver (VPD)*, ekskavator yang bergerak memindahkan, mengambil material konstruksi, dan menumpahkan material menghasilkan level maksimum PPV hanya 0,0012 mm/second.

VPD menghasilkan level maksimum dalam paparan tiga jam sebesar 0,12 mm/second pada jarak 200 m. Kondisi ini tidak berpengaruh sekali terhadap konstruksi bangunan dan pemukiman penduduk di sekitar proyek.^[7,8,13]

Jika dibandingkan BS 6472-1:2008 perencanaan lampiran 1 dan 2 untuk sinyal getar pada frekuensi 50 Hz kurva 1, paparan getaran level maksimum 16 jam untuk konstruksi bangunan pemukiman dengan nilai 0,2 sampai 0,4 mm/second pada frekuensi 1–80 Hz.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, dapat disimpulkan paparan getar yang dihasilkan oleh mesin dan alat-alat konstruksi pembangunan bendungan pengelak lahar dingin tidak memengaruhi konstruksi bangunan pemukiman dan

fasilitas umum yang ada di sekitar pembangunan proyek.

Level maksimum yang terdeteksi pada jarak 50 m sebesar 8,1 mm/second dihasilkan oleh Mounted Hammer pada saat sedang melakukan demolisi dan Impact Hammer menghasilkan level 7,9 mm/second, sedangkan alat-alat yang lain sangat rendah level PPV-nya; semuanya menghasilkan level di bawah nilai perkenaan referensi 7, 8, 9, dan 12.

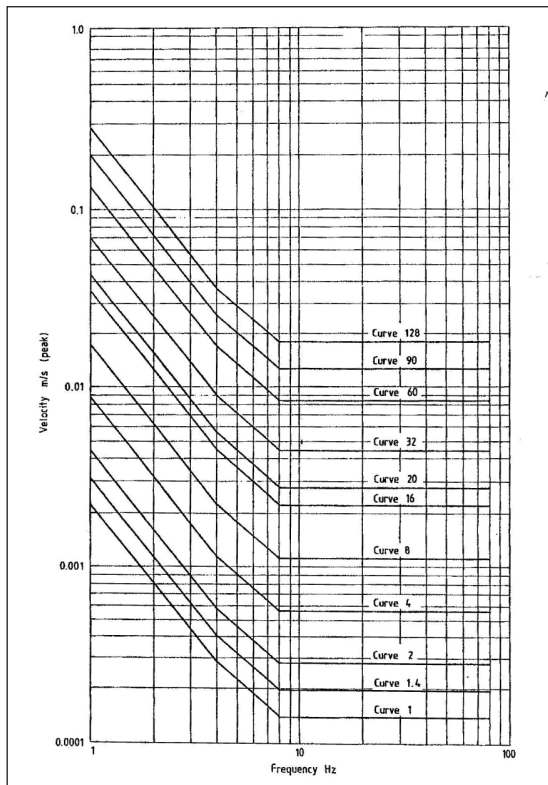
Untuk menghindari sinyal getar palsu bagi instrumen peringatan dini banjir lahar, seharusnya pemasangan sensor getar diletakkan pada jarak lebih dari 250 meter dari lokasi proyek konstruksi yang sedang berlangsung.

6. UCAPAN TERIMAH KASIH

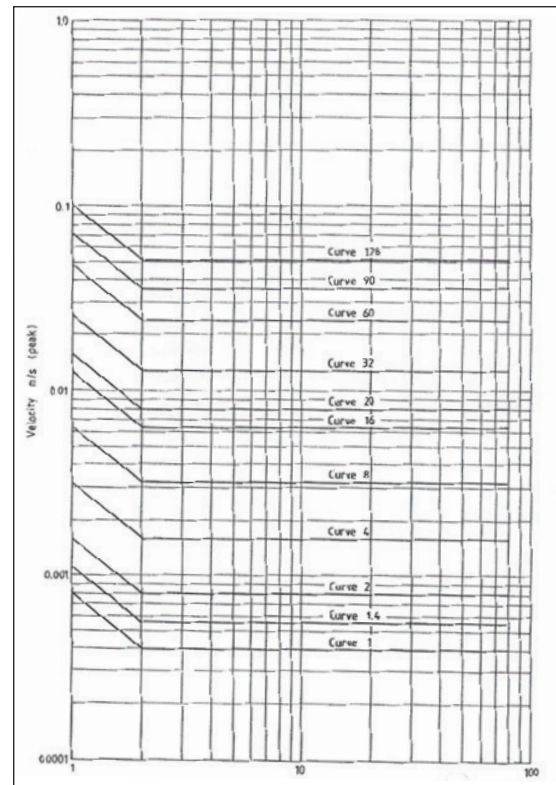
Penelitian ini merupakan bagian dari proyek rehabilitasi dan otomatisasi peringatan dini banjir lahar gunung berapi tahun 2009–2010 bekerja sama dengan Balai Sabo Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Metrologi LIPI, Kepala Proyek Rehabilitasi Peringatan Dini Banjir Lahar Gunung Merapi, Staf Balai Sabo, dan Team Rehabilitasi LIPI.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ismail, Mohd Azmi, dkk. 2002. "Penggunaan Teknik Gelombang Permukaan dalam Kajian Geologi Kejuruteraan." *Geological Society of Malaysia Annual Geological Conference*.
- [2] Maslin, Andy. 2004. "Monitoring Ground Vibration Arising from Pilling and Civil Engineering Project." *Accudata Limited*.
- [3] Sholihan, Ahmad dan Bagus Jaya Santosa. 2010. "Analisis Dispersi Gelombang Rayleigh Struktur Geologi Permukaan." Jurusan Fisika FMIPA ITS.
- [4] Newmark, Marc S., dkk. 2011. "Monitoring Construction Vibration at Sensitive Facilities." *Sound & Vibration*, Edisi December.
- [5] Deckner, Fanny. 2013. "Ground Vibration Due Pile Driving-influence Factors, Prediction and measurement." *KTH Royal Institute of Technology Stockholm*.
- [6] Report of preliminary. 2011. "Sediment-related Disaster Warning and Evacuation Guideline." *Sabo Department, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism*.
- [7] BS 6472-1:2008. 2008. "Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole Body Mechanical Vibration and Repeated Shock."
- [8] BS 6472:1992. "Evaluation of Human Exposure to Vibration in Building (1–80 Hz)."
- [9] ENV1993-5 Eurocode 3. Design of steel structure-part 5: Pilling.
- [10] Rochill, D. J M.D, dkk. 2011. "Ground Borne Vibrations Due to Press-in Piling Operations." Cambridge University Engineering Department.
- [11] Allan, M., D. Duschhilauber, dkk. 2010. "Implications of Updating the Vibration Assessment Methodology of BS6472 from the 1992 to the Revised 2008 Version." *Technical Note Australian Acoustic society*.
- [12] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 36 Tahun 2005 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 Tentang Bangunan Gedung.
- [13] Rosyidi, Sri Atmaja P. 2012. "Gelombang Rayleigh untuk Penyelidikan Seismik Sub-Permukaan." Diakses dari <http://atmaja.staff.umv.ac.id/2012/06/06>.
- [14] Baziw, Erick dan Gerald Verbeck. "Relating Peak Particle Velocity and Acceleration to Moment Magnitude in Passive (Micro) Seismic Monitoring." Technical Note 3, BCE Sub Surface Diagnostic.



Lampiran 1. Kurva PPV yang Disarankan untuk Gedung pada Frekuensi 1–80 Hz di Sumbu z ^[4]



Lampiran 2. Kurva PPV yang Disarankan untuk Bangunan Gedung pada Frekuensi 1–80 Hz pada Sumbu x, y ^[4]

Nomor Kurva	Frekuensi beban		
	Percepatan m/second ²	Peak Partikel Velocity mm/second	ratio
1	0,005	0,141	28,2
1,4	0,007	0,197	28,2
2	0,010	0,282	28,2
4	0,020	0,564	28,2
8	0,040	1,128	28,2
16	0,080	2,256	28,2
20	0,100	2,820	28,2
32	0,160	4,512	28,2
60	0,300	8,460	28,2
90	0,450	12,69	28,2
128	0,640	18,05	28,2

Lampiran 3a. Hubungan Antarnomor Kurva dengan Perubahan Percepatan dan PPV^[4]

Frekuensi Hz	PPV m/second
1,25	$2,25 \times 10^{-3}$
1,60	$1,61 \times 10^{-3}$
2,00	$1,11 \times 10^{-3}$
2,50	$7,96 \times 10^{-3}$
3,15	$5,69 \times 10^{-3}$
4,00	$4,02 \times 10^{-3}$
5,00	$2,81 \times 10^{-3}$
6,30	$2,25 \times 10^{-3}$
8,00	$1,79 \times 10^{-3}$
10,00	0,141
12,50	
16,00	
20,00	
25,00	
31,50	
40,00	
50,00	
63,00	
80,0	

Lampiran 3b. Harga PPV untuk Kurva 1 ^[4]

Frekuensi Hz	PPV m/second
1	$8,04 \times 10^{-4}$
1,25	$6,43 \times 10^{-4}$
1,60	$5,02 \times 10^{-4}$
2,00	} 0,402
2,50	
3,15	
4,00	
5,00	
6,30	
8,00	
10,00	
12,50	
16,00	
20,00	
25,00	
31,50	
40,00	
50,00	
63,00	
80,00	

Lampiran 4. Harga PPV untuk Kurva 1^[4]