

PENGUKURAN GETARAN TANAH AKIBAT GUGURAN BATU VULKANIK YANG DUDUKANNYA TERGERUS ANGIN

(MEASUREMENT OF GROUND VIBRATION DUE TO AVALANCHES OF VOLCANICS ROCKS WHERE THEIR BEDS ERODED BY WINDS)

Hari H. Santoso

Puslit Metrologi LIPI, Puspiptek Serpong, Tangerang, Banten
harihadi@kim.lipi.go.id

ABSTRAK

Lava yang mengendap di puncak atau lereng gunung berapi akibat letusan beberapa tahun sebelumnya biasanya mempunyai komposisi pasir, debu, dan batuan vulkanik. Endapan lava yang didudukkan kesetimbangan pada umumnya tidak stabil tersebut merupakan bahaya laten yang setiap saat dapat meluncur ke kaki bukit atau permukiman di sekitarnya apabila kesetimbangannya terganggu oleh gerusan angin atau curah hujan yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan potensi guguran lava pada saat musim kemarau yang disebabkan oleh gerusan angin kering. Fokus penelitian ini berupa sebuah batu vulkanik yang mempunyai volume sekitar 4 m³ (setara dengan 8.800–10.000 kg) dengan sudut kemiringan di atas 40° dan berada pada titik kritis jatuh sehingga merupakan sumber bahaya guguran batu. Penelitian ini dilakukan selama musim kemarau pada bulan Juli–September 2012 di lereng utara Gunung Merapi dengan menggunakan 3 sensor akselerometer yang diletakkan pada posisi yang berbeda, sedangkan pengukuran kecepatan dan arah angin diletakkan pada lokasi stasiun sensor 1. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada musim kemarau tersebut terjadi longsoran endapan batu vulkanik yang disebabkan oleh gerusan angin kering.

Kata kunci: Gunung Merapi, lava, guguran lava, kecepatan dan arah angin, akselerometer.

ABSTRACT

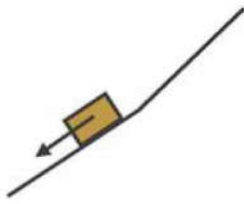
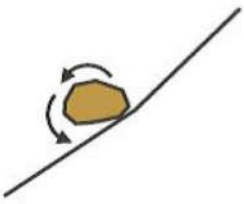
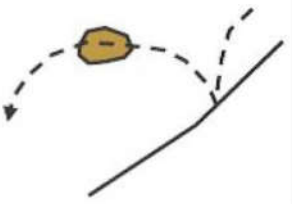
Settling lava, on the top or mountain side of a volcano, due to the eruption in some years ago usually consists of sand, dust, and volcanic rocks. The deposition condition that generally in an unstable state is a latent danger that can be slid any time to the foot hill or surrounding settlements if its equilibrium is disturbed by wind scour or heavy rainfall. The aim of this study is to determine the potential of lava avalanche during dry season due to the scour of dry wind. The focus of this research was a volcanic rock with its volume around 4 m³ (equivalent to 8,800–10,000 kg) with its slope angle above 40° and at the critical point to fall so it was a source of rock avalanche danger. The research was conducted during the dry season in July–September 2012 on the northern slope of Mount Merapi using 3 accelerometer sensors placed at different positions, while the measurement of wind speed and direction was located at sensor station 1. The result of this study indicates that in the dry season, there was an avalanche of volcanic sedimentary rock caused by dry wind scours.

Keywords: Mount Merapi, lava, lava avalanches, wind direction and speed, accelerometer.

1. PENDAHULUAN

Guguran endapan lahar dan guguran batu vulkanik merupakan suatu peristiwa yang sering terjadi pada lereng-lereng bukit dengan kemiringan lebih dari 40° atau posisi batu vulkanik terletak pada titik kritis kesetimbangan posisi. Penelitian ini dilakukan saat musim kemarau dengan tujuan untuk mengetahui pada saat musim kemarau sering terjadi pula guguran batu vulkanik atau longsoran endapan lahar dingin. Peristiwa ini terjadi karena gerusan angin

secara terus-menerus di daerah potensi longsoran berupa batu vulkanik yang menggantung pada lokasi titik kritis kesetimbangan. Keadaan ini sangat membahayakan para penambang pasir yang bekerja di tengah saluran aliran guguran lahar. Pengukuran nilai aselerasi getaran yang ditimbulkan longsoran batu-batu bervolume besar dari atas tebing-tebing kritis dengan kemiringan lebih besar dari 40° bertujuan untuk membuat indikasi awal terjadinya longsoran atau menggelincirnya batu-batu gunung karena

<i>motion Pattern</i>	<i>Sliding</i>	<i>Rolling</i>	<i>Bouncing</i>
<i>Diagram</i>			
<i>Characteristic</i>	<i>Slide down slope</i>	<i>Rolls Down Slope</i>	<i>Bounce in the air and moves down ward</i>
<i>Falling speed</i>	<i>Slow</i>	<i>Average</i>	<i>Fast</i>

Sumber: Ching-Jer Huang *et al.*, 2007

Gambar 1. Berbagai Jenis Guguran

perubahan kesetimbangan akibat gerusan angin atau penggalian pasir, khususnya yang terjadi pada musim kering. Indikasi awal adanya pergerakan benda besar dari atas bukit ke arah bidang gelincir ke kaki bukit menjadi peringatan dini bagi penambang pasir dan kegiatan pekerjaan sipil di lereng bukit yang terjal.

2. TINJAUAN KEPUSTAKAAN

Bencana alam longsor dan guguran batu vulkanik sering terjadi di lereng-lereng atau patahan di sekitar gunung berapi. Apabila massa yang bergerak (Gambar 1) didominasi oleh batu kerikil, pasir, dan batuan vulkanik serta gerakannya melalui suatu bidang miring ataupun lengkungan, proses tersebut dikatakan sebagai guguran lahar dingin.³ Pergerakan lahar dingin mempunyai beberapa karakter yang berbeda-beda.¹

Ada enam jenis tanah longsor, yakni longsor translasi, longsor rotasi, pergerakan blok, runtuh batu, rayapan tanah, dan aliran bahan rombakan.⁴

- 1) Longsor translasi adalah Bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk rata atau menggelombang landai.
- 2) Longsor rotasi adalah Bergeraknya massa tanah dan batuan pada bidang gelincir berbentuk cekung.

- 3) Pergerakan blok adalah perpindahan batuan yang bergerak pada bidang gelincir berbentuk rata. Longsor ini disebut juga longsor translasi blok batu.
- 4) Runtuhan batu terjadi ketika sejumlah besar batuan atau material lain bergerak ke bawah dengan cara jatuh bebas. Runtuhan ini umumnya terjadi pada lereng yang terjal hingga menggantung terutama di daerah pantai. Batu-batu besar yang jatuh dapat menyebabkan kerusakan yang parah.
- 5) Rayapan tanah adalah jenis tanah longsor yang bergerak lambat. Jenis tanahnya berupa butiran kasar dan halus. Jenis tanah longsor ini hampir tidak dapat dikenali. Setelah waktu yang cukup lama, longsor jenis rayapan ini bisa menyebabkan tiang-tiang telepon, pohon, atau rumah miring ke bawah.
- 6) Aliran bahan rombakan adalah longsor material tanah yang bergerak karena adanya tekanan air dan bergerak sepanjang lembah mengikuti aliran air. Kecepatan alirannya bergantung pada kemiringan lembah, intensitas curah hujan, dan tekanan air.

Longsor translasi dan rotasi paling banyak terjadi di Indonesia,² sedangkan longsor yang paling banyak memakan korban jiwa manusia adalah aliran bahan rombakan.⁶

Penulis melakukan penelitian ini dengan cara mengukur amplitudo getaran tanah akibat runtuhnya batu yang terjadi pada saat musim kemarau karena pada musim kemarau angin yang menuruni gunung bersifat kering, berlangsung pada waktu yang lama, bergerak sangat cepat, dan mempunyai tenaga yang cukup tinggi untuk mengikis ikatan kedudukan batu vulkanik yang membeku di atasnya. Sebagai gambaran, kecepatan angin 40–45 km/jam dapat menghasilkan tekanan setara dengan 105 pascal atau sebanding dengan 1,01971 kg/cm², sedangkan pada kecepatan 80 km/jam setara dengan tekanan 300–345 pascal atau 3,67014 kg/cm².⁸

Model pergerakan penurun jatuhnya batu (seperti pada Gambar 1) dapat berbentuk menggelinding, menggelinding dengan kombinasi terlempar, atau melompat-lompat. Massa batu yang menggelinding atau kombinasi menggelinding dengan melompat-lompat diperkirakan membangkitkan sumber getar dengan akselerasi sebesar 0,1 G sampai dengan 3 G bergantung pada besar kecilnya batu yang tergelincir karena lepas dari ikatan induknya. Longsoran batu yang besarnya di atas 50 kg dapat menggerus dasar dan dinding dari saluran yang dilaluinya. Ini mengakibatkan terjadinya longsoran ikutan sedemikian hingga material longsor menjadi lebih besar, tetapi getaran yang ditimbulkan longsor ikutan sangat kecil jika tidak terdapat guguran batu lebih besar yang terkikis dan ikut terdorong ke arah aliran lahar.³ Getaran seismik yang merambat di tanah dengan sumber getar berasal dari guguran batu dan gerakan batu vulkanik ke arah hilir yang menggesek dasar dan dinding saluran lahar dingin dapat diukur dengan menggunakan *seismic accelerometer*.¹

Seismic accelerometer adalah salah satu dari beberapa sensor getar yang digunakan sebagai instrumen untuk mengukur getaran tanah akibat guguran batu vulkanik. Sensor ini dipilih karena mempunyai beberapa kelebihan, yaitu mampu mendeteksi frekuensi getar dengan rentang ukur yang lebih lebar bahkan mampu mendeteksi frekuensi rendah. *Seismic accelerometer* tidak hanya digunakan sebagai sensor pengukuran dan pengawasan. Sensor ini di beberapa tempat digunakan pula sebagai sensor untuk

peringatan dini guguran batu vulkanik, seperti di Lattenbach, Austria^{1,4,6}.

3. LOKASI PENGUKURAN

Lokasi pengukuran rambatan getaran pada tanah hasil guguran batu pada penelitian ini dilakukan di bantaran Sungai Kali Lamat yang termasuk wilayah Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. Potensi guguran terletak pada lintang selatan 7°33.850", bujur timur 110°24.972" dan pada elevasi 1.182 mdpl. Dengan kemiringan bidang luncur yang bervariasi antara 35° dan 50°, potensial material luncur terletak pada posisi dengan ketinggian 20–30 meter dari dasar saluran aliran lahar dingin. Potensi guguran berupa kumpulan batu besar diperkirakan sebesar 4 m³ dan beratnya 8.800 kg, jika massa jenis batu vulkanik 2.200 kg/m³. Energi yang menimpa dasar saluran dari ketinggian 30 meter diperkirakan mencapai 8.800 x 10 x 30 = 2.640.000 joule dan dengan kecepatan luncuran 10√6 m/s.

Dasar saluran aliran lahar dingin berupa kombinasi material vulkanik yang terdiri dari pasir, batu kerikil, dan kumpulan batu pecah, dengan kemiringan saluran rata-rata pada 20° dan di beberapa tempat bervariasi antara 20°–40°. Kondisi kemiringan saluran ini sama keadaannya sampai dengan lokasi sensor 1. Keadaan dasar saluran tersebut kemudian berubah, dan kecuramannya bervariasi antara 10° dan 25°. Bahkan, di beberapa tempat kemiringannya sudah mendatar setelah melewati lokasi stasiun (sensor) 1 atau setelah menuju ke arah titik ukur sensor 2 dan titik ukur sensor 3.



Gambar 2. Lokasi Potensi Guguran dan Letak Sensor Getar yang Digunakan

Sensor getar nomor 1 diletakkan di bantaran saluran aliran lahar pada ketinggian 2 meter dari dasar saluran agar tidak hanyut apabila ada aliran dan pergerakan lahar pada lokasi 7°34,063" lintang selatan dan 110°24,853" bujur timur. Begitu pula sensor getar nomor 2 diletakkan pada bantaran aliran lahar dengan ketinggian 3 meter dari saluran pada posisi 7°34,564" lintang selatan dan 110°24,127" bujur timur, pada jarak 2 km. Sensor-sensor ini berfungsi untuk memonitor keadaan pergerakan guguran material dan mendeteksi serta menginformasikan keadaan aliran yang berhenti atau masih bergerak mengalir ke arah sensor getar 3. Sensor getar nomor 3 diletakkan pada jarak 5 km dari potensi guguran dan longsoran batu pada posisi 7°35,942" lintang selatan dan 110°22,932" bujur timur. Sensor nomor 3 digunakan untuk memonitor pergerakan lanjutan sebelum guguran lahar dingin dan material erosi mencapai permukiman terdekat. Sensor nomor 3 hanya berjarak 2,7 km dari permukiman.

4. METODOLOGI PENGUKURAN & KONFIGURASI INSTRUMEN

Getaran yang merambat dalam tanah akibat runtuhnya batu vulkanik yang dudukannya tergerus oleh angin diukur dengan 3 *seismic accelerometer* BK 8430 dengan sensitivitas 10.000 mV/G. Sensor 1 diletakkan pada jarak 200 meter dari target yang diketahui rawan guguran, yang kedua pada jarak 2 km, dan terakhir pada jarak 5 km.

Sensitivitas sensor ini mampu mendeteksi getaran dengan akselerasi getar 0,1 G sampai dengan 3 G dengan catu daya 3,3 volt arus searah. Untuk pengolahan data, digunakan prosesor dsPIC 802 Arduino (manual dan spesifikasi teknis *seismic accelerometer* BK 8430). Kecepatan dan arah angin diukur dengan anemometer Wilh Lambert (1455) tipe mangkok, dengan akurasi untuk kecepatan angin 0,1 m/s dan arah angin 0,1°, dan sinyal output 5,1 mA pada 60 m/s.

Penelitian ini hanya melakukan pengukuran amplitudo getaran di tanah akibat runtuhnya batu, khususnya yang terjadi pada saat musim kering. Pada waktu tersebut runtuhnya batu yang

mengendap pada bidang kritis akan terkikis oleh kekuatan angin yang turun gunung dan umumnya mempunyai kecepatan dan tenaga yang cukup tinggi, atau pengikisan oleh penambang pasir di bawah titik setimbangnya.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 2 set instrumen, yaitu instrumen yang bersifat *remote monitoring* dan instrumen yang berfungsi sebagai pengolah data dan instruksi pelaksanaan indikasi peringatan dini. *Remote instrument* terdiri atas 1 sensor kecepatan dan arah angin, 3 sensor getar seismik dengan sensitivitas 10.000 mv/G, kisaran frekuensi 0,1–1.500 Hz. Perangkat pengolah data menggunakan prosesor dsPIC802 Arduino yang dilengkapi dengan modulator dan *radio transmitter* pada frekuensi 922–925 MHz dengan daya transmisi 5 watt. Karena menggunakan *transmitter* dengan daya yang rendah, diperlukan *mobile repeater* dengan daya transmisi 10 watt pada frekuensi 70 MHz. *Remote monitoring* dipasang pada tiga lokasi yang masing-masing pada jarak 500 m, 2 km, dan 5 km dari lokasi potensi guguran. Lokasi ketiga sensor getar digambarkan seperti pada Gambar 4, sedangkan arsitektur konfigurasi instrumen pengukuran deteksi guguran digambarkan pada Gambar 5.

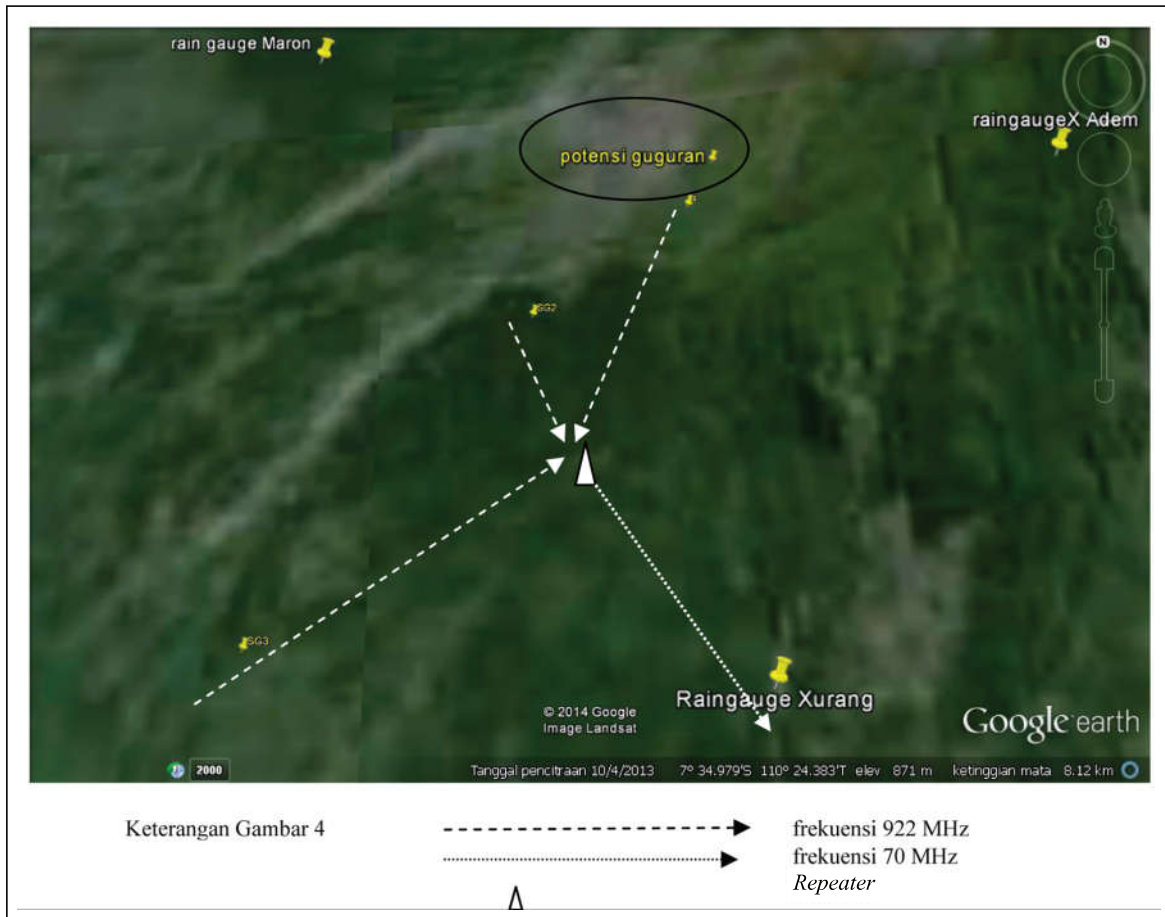
Seperti halnya sensor getar 1, hasil pengukuran dan pengamatan harian kecepatan dan arah angin pada lokasi sensor getar 1 dikirim pula ke pusat pengamatan Kaliurang. Untuk mengetahui kondisi semua sensor apakah dalam keadaan *stand by*, stasiun sensor 1, 2, dan 3 mengirimkan sinyal tegangan baterainya setiap hari minimum 1 kali ke pusat pengamatan Kaliurang.



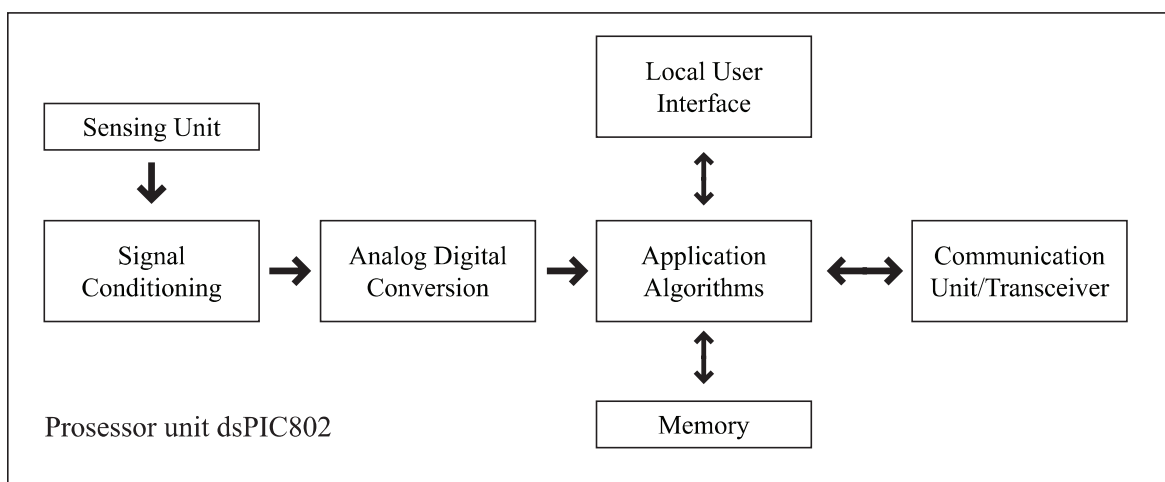
Gambar 3. Sensor *Seismic Accelerometer* BK 8430

Bingkai data transmisi yang dikirim dari stasiun pengawasan sensor getar 1 sampai dengan 3 terdiri dari tiga bingkai dasar transmisi, yaitu *start bit* yang terdiri dari 8 bit, data transmisi yang terdiri dari 32 bit berisi tanggal (hari, bulan, tahun), waktu (jam, menit, detik), nomor

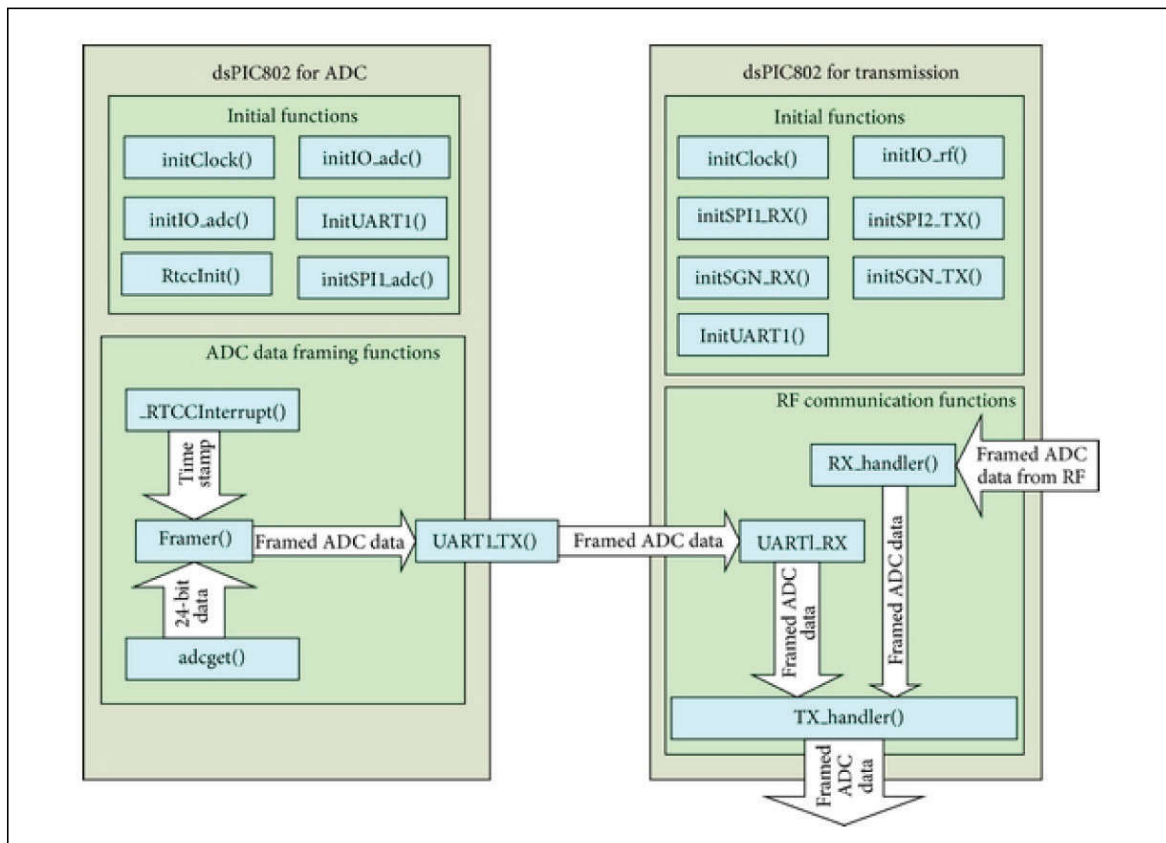
stasiun (nomor, jenis sensor), data pengukuran 8 bit dan diakhiri dengan *stop bit*. Laporan keadaan stasiun sensor secara harian dikirim setiap pukul 7 pagi dengan format yang sama, tetapi nomor sensor diganti dengan pengodean untuk sensor tegangan baterai.



Gambar 4. Diagram Komunikasi Data



Gambar 5. Konfigurasi Instrumen Pengukuran Deteksi Guguran



Gambar 6. Arsitektur Prosesor dsPIC802 Arduino yang Digunakan untuk Pengukuran Getaran

5. HASIL PENGUKURAN DAN PERCOBAAN

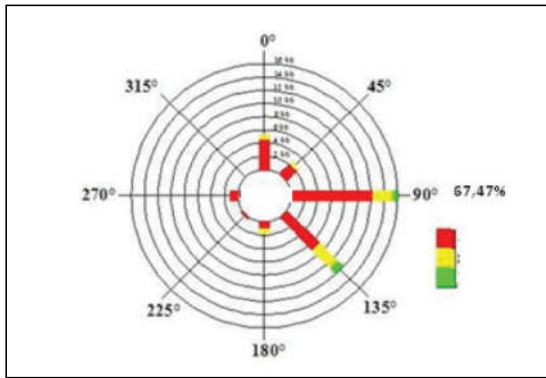
Sensor Kecepatan dan Arah angin

Pengukuran deteksi guguran dan longsoran endapan batu vulkanik yang sangat tidak stabil dilakukan pada bulan Agustus–September 2012 dengan curah hujan sudah jarang terjadi. Pada saat itu, angin kering dari utara Merbabu cukup berperan untuk menggerus dan menerbangkan ikatan endapan batu vulkanik pada daerah berpotensi gugur. Dari hasil pengukuran kecepatan angin dan arah angin, umumnya sebagian besar angin dari barat sebesar 67,47% dengan kecepatan rata-rata 8–14 km/jam dan kecepatan maksimum pada bulan-bulan tersebut 80 km/jam, berubah dari tenggara dengan kecepatan minimum 4 km/jam. Kecepatan maksimum 14 km/jam dan kembali timur dengan besar kecepatan yang tidak berubah 8–80 km/jam. Dengan melihat hasil pengukuran kecepatan angin di lokasi potensi guguran batu vulkanik, terjadi penggerusan secara terus-menerus dan

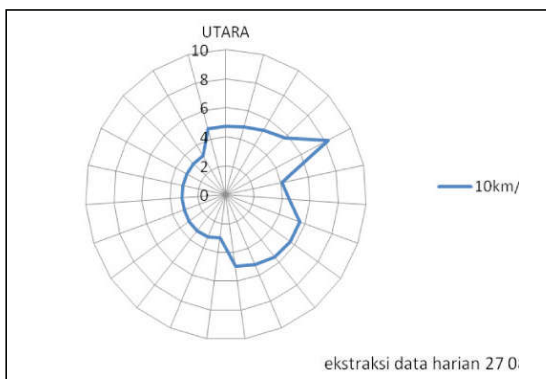
sedikit demi sedikit lapisan pengikat endapan batu-batuan vulkanik diterbangkan angin sedemikian hingga pengikat batu-batuan hilang atau berkurang kesetimbangannya.

Hasil pengukuran kecepatan angin dan arah angin selama penelitian dapat dilihat seperti pada Gambar 6, yang digambarkan dalam bentuk diagram mawar angin (*wind rose diagram*). Diagram ini menunjukkan nilai kecepatan angin dan arah angin selama tiga bulan pada lokasi sensor 1. Penggerusan oleh angin menyebabkan ikatan batu vulkanik terhadap bidang pengikatnya hilang sehingga batu vulkanik longsor dan menggelinding ke bawah.

Gambar 8 menggambarkan data harian kecepatan dan arah angin pada saat longsor. Pada saat itu, sebagian besar arah angin dari sisi timur (arah jam 4) dengan kecepatan 80 km/jam dan berubah dari arah jam 7 sampai jam 11 yang mempunyai kecepatan rata-rata 40–55 km/jam. Rekaman data *seismic accelerometer* memberikan sinyal getar pertama pada pukul 07:03:21 tanggal 27 Agustus 2012.



Gambar 7. Diagram Mawar Angin di Lokasi Sensor Getar 1



Gambar 8. Data Harian Arah dan Kecepatan Angin Saat Longsor Terjadi

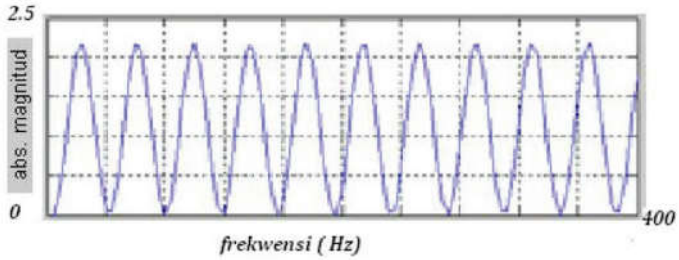
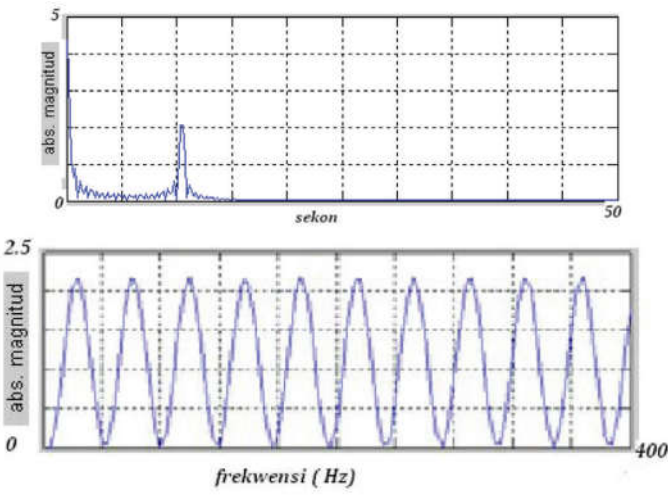
Tabel 1. Hasil Percobaan Simulasi Luncuran Jatuh Bebas pada Beberapa Ketinggian untuk Sensor 1 pada Jarak 5 Meter dari Titik Jatuh

No.	Berat Beban	Ketinggian	Hasil Percobaan
1	20 kg	10 meter	
2	15 kg	10 meter	

Sensor Getar *Seismic Accelerometer* BK 8430

Pengukuran getaran tanah yang menggunakan sensor seismik BK 8430 dilakukan dua tahap. Tahap pertama pengukuran dilakukan dengan simulasi dan tahap kedua dilakukan pengukuran di lapangan secara *real time*.

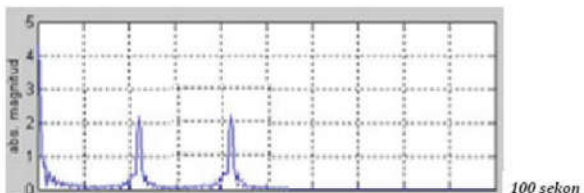
Tahap pertama sebelum dipasang di lapangan, sensor getar diuji lebih dulu di laboratorium dengan simulasi penjatuhan. Percobaan ke-1 dilakukan dengan satu kali penjatuhan dengan objek yang digunakan adalah beban 20 kg dan 15 kg, pada ketinggian 8 meter dan 10 meter. Sensor getar diletakkan pada jarak 5 meter dari titik jatuh dan hasil percobaannya dapat dilihat pada Tabel 1. Percobaan ke-2 dilakukan dua kali penjatuhan dengan selang waktu 10 detik untuk setiap penjatuhan beban 20 kg pada ketinggian bervariasi antara 10 m, 15 m, dan 20 m. Hasil percobaannya dapat dilihat pada Tabel 2.

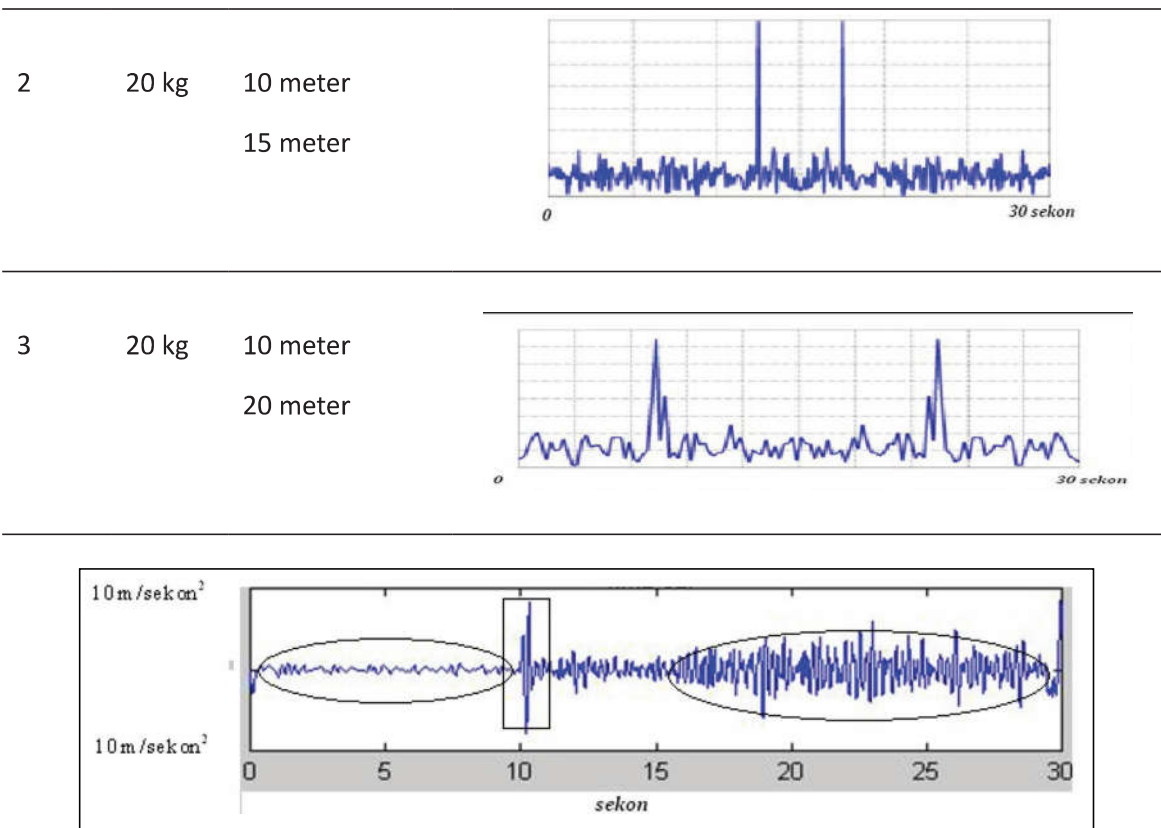
No.	Berat Beban	Ketinggian	Hasil Percobaan
			
3	15 kg	8 meter	

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran *seismic accelerometer* dengan simulasi sumber getar beban 20 kg dan 15 kg yang dijatuhkan pada ketinggian 20 m, 15 m, dan 8 m. Hasil pengukuran simulasi percobaan nomor 1 diperoleh nilai sebesar 50 Hz dan absolut magnitudenya 2 skala pada 10 sekon setelah jatuhnya.

Percobaan nomor 2 menghasilkan nilai getaran yang diterima asselerometer pada frekuensi 80 Hz dengan absolut magnitude sebesar 2 skala, sedangkan pada percobaan nomor 3 dengan beban jatuhan 15 kg diperoleh frekuensi 80 Hz dengan 2 skala absolut magnitude pada 10 sekon setelah jatuhnya.

Tabel 2. Hasil Percobaan Simulasi Luncuran Jatuh Bebas pada Beberapa Ketinggian untuk 2 Sensor

No.	Berat Beban	Ketinggian, Jarak Antarsensor	Hasil Percobaan
1	20 kg	10 meter 10 meter	



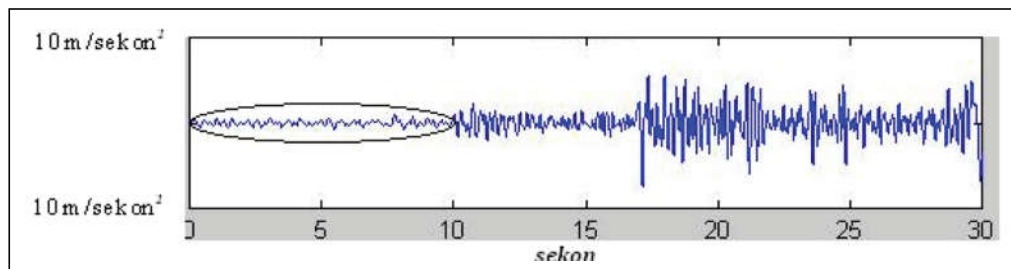
Gambar 9. Tanggapan Sensor Getar 1 Sesaat Setelah Terjadi Guguran dan Longsoran

Tabel 2 berisi data pengukuran hasil percobaan simulasi yang ke-2 dengan menggunakan pengamatan 2 sensor *seismic accelerometer* yang diletakkan pada lokasi yang berbeda. Pada percobaan nomor 1, sensor pertama pada jarak 10 m dari titik jatuh dan sensor ke-2 pada jarak 20 meter dari titik jatuh. Pada percobaan nomor 2, sensor pertama pada jarak 10 m dari titik jatuh dan sensor ke-2 pada jarak 25 m dari titik jatuh. Pada percobaan nomor 3, sensor pertama pada jarak 10 m dari titik jatuh dan sensor ke-2 pada jarak 30 m dari titik jatuh, dengan beban berat yang sama (20 kg) dan dengan hasil yang berbeda. Percobaan nomor 1, hasilnya sensor getar 1 mendeteksi jatuhnya beban berat simulasi setelah 20 sekon dan sensor ke-2 mendeteksi jatuhnya beban berat 10 sekon kemudian, absolut magnitude yang terukur sebesar 2 skala. Percobaan nomor 2 hasilnya sensor getar 1 mendeteksi jatuhnya beban berat simulasi setelah 15 sekon dan sensor getar 2 mendeteksi 10 sekon kemudian, absolut magnitude yang terukur sebesar 5 skala. Pada percobaan nomor 3, hasilnya sensor getar 1 mendeteksi jatuhnya beban berat simulasi setelah

13 sekon dan sensor ke-2 mendeteksi 15 sekon kemudian dengan absolut magnitude sebesar 5 skala.

Pada tahap kedua, dilakukan pengukuran getaran tanah secara *real time* selama tiga bulan di lokasi potensi guguran batu vulkanik pada bulan Juli–September 2012. Dari pengamatan selama tiga bulan, hanya terjadi longsor satu kali pada tanggal 27 Agustus 2012 pukul 07:03:21 dan hasil pengukuran getarannya dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Gambar 9 menunjukkan tanggapan sensor getar 1 setelah terjadi guguran. Pada 10 sekon pertama, percepatan getaran terukur 1–2 m/s^2 . Pada saat ini, batu vulkanik yang gugur menggelinding (*rolling*) ke arah sungai (*river bank*) dengan kecepatan rata-rata 300 m/s pada saat tepat 10 sekon percepatan getaran yang terukur oleh sensor getar 8 m/s^2 . Pada saat tersebut, terjadi tumbukan antara guguran batu dan dasar saluran. Seterusnya, batu menggelinding dan melompat-lompat (*bouncing*) ke arah hilir seperti pada tahap 15 sampai 30 sekon



Gambar 10. Tanggapan Sensor Getar 2 Sesaat Setelah Terjadi Guguran dan Longsoran

kemudian. Indikasi *bouncing* terlihat dari hasil pengukuran pada tahap tersebut, amplitudo getaran bervariasi antara 2 m/s^2 dan maksimum 5 m/s^2 . Ini disebabkan oleh dasar saluran sungai penuh dengan batu-batu yang menghambat laju guguran batu yang longsor. Pada 30 detik terakhir, material longsor tidak bergerak lagi dengan menghasilkan percepatan getaran $9\text{--}10 \text{ m/s}^2$ karena menimpa endapan material yang lebih besar dan berat. Timbunan longsor batu dan material baru terlihat berhenti pada jarak 3,2 km dari posisi awal.

Gambar 10 memperlihatkan sensor getar 2 yang juga memberikan respons pengukuran dengan sifat longsor yang sama. Tahap 0–10 sekon pertama bersifat *rolling* dengan nilai ukur percepatan $1\text{--}2 \text{ m/s}^2$ dan naik $1\text{--}3 \text{ m/s}^2$ pada 11–17 sekon kemudian, dan secara tajam pada 17 sekon kemudian dan terjadi peningkatan akselerasi pada detik ke-17. Karena pergerakan longsor batu dan material telah melewati posisi sensor 2, pola pergerakan luncuran melompat-lompat (*bouncing*). Dasar saluran berupa endapan material yang terdiri atas batu, kerikil, dan gundukan pasir. Guguran berhenti pada detik ke-30 dengan nilai pengukuran $5\text{--}8 \text{ m/s}^2$. Dengan nilai akselerasi hampir merata ini berarti batu tunggal yang gugur dan menggelinding di daerah saluran mendapat hambatan 17 sampai 22 sekon pertama.

Sensor getar 3 tidak memberikan tanggapan atau tidak mendapatkan sinyal pergerakan dari sumber getar karena letaknya 5 km dari sensor getar 2 atau 7,5 km dari potensi guguran.

Kecepatan dan arah angin merupakan salah satu faktor penyebab runtuh atau gugurnya batu vulkanik yang berpotensi runtuh. Indikasi awal terjadinya longsor atau guguran batu vulkanik dapat dideteksi dan diukur menggunakan *seismic*

accelerometer dengan ketelitian $0,5 \text{ m/s}^2$. Waktu yang diperlukan untuk pengiriman data adalah sekitar 2 sekon setelah peristiwa guguran batu lepas dari posisi ikatannya.

Hasil penelitian penulis mempunyai persamaan dan perbedaan dengan hasil penelitian yang menjadi bahan acuan dalam penelitian ini. Harga *property* getaran yang diperoleh mempunyai nilai hampir sama. Frekuensi yang diperoleh adalah antara 40–140 Hz dan sangat jarang mencapai 140 Hz. Jika terjadi, hal tersebut disebabkan oleh pergerakan guguran batu vulkanik yang terhambat batu-batu yang mengendap dan terakumulasi di dasar saluran sehingga akan terjadi kenaikan amplitudo karena terjadi tumbukan di antaranya. Besarnya amplitudo getaran berbanding lurus dengan jumlah aliran longsor batu vulkanik. Hal ini selaras dengan penelitian di Fong-Ciou Creek dan Ai-Yu-Zi Creek Taiwan.³

6. KESIMPULAN

Dari pengamatan dan pengukuran tersebut, dapat disimpulkan bahwa guguran dan longsor endapan batu vulkanik dapat terjadi karena landasannya terkikis secara terus-menerus oleh angin dengan kecepatan rata-rata 8–14 km/jam. Kecepatan maksimum angin saat terjadi longsor adalah 55 km/jam, sedangkan rata-rata kecepatan angin 35–55 km/jam. Kecepatan angin 40–45 km/jam setara dengan tekanan angin 105 pascal atau sebanding dengan $1,01971 \text{ kg/cm}^2$ (Storm Shield; *windspeed to conversion pressure chart*). Dari hasil pengukuran dengan menggunakan sensor akselerometer dapat dideteksi terjadinya pergerakan guguran endapan batu vulkanik yang memang berpotensi gugur dan longsor. Sensor ini dapat pula digunakan untuk kelengkapan dalam pembuatan perangkat

peringatan dini guguran endapan batu vulkanik ke arah saluran pengendali banjir lahar dingin, tempat umumnya penambang pasir melakukan kegiatan.

7. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari proyek rehabilitasi dan revitalisasi sistem peringatan dini banjir lahar dingin di sekitar Gunung Merapi yang meliputi Kabupaten Magelang, Sleman, Klaten, dan Kota Yogyakarta. Kegiatan penelitian ini berlangsung atas kerja sama Balai Sabo Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman dengan Koperasi Pegawai Puslit Metrologi-LIPI. Untuk itu, kami mengucapkan terima kasih kepada Ketua Koperasi Puslit Metrologi-LIPI, Kapus Puslit Metrologi-LIPI, dan staf peneliti Balai Sabo Kementerian Pekerjaan Umum dan Pemukiman atas bantuan dan kerja sama dalam melaksanakan penelitian ini hingga selesai.

8. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abanco, C. dan M. Hurlimann. 2013. *Analysis of the Ground Vibration Produced by Debris Flow and Other Torrential Processes at Rebaixander Monitoring Site*. Natural Hazards and Earth System sciences Spain.
- [2] Achmad, Fadly. 2010. "Studi Identifikasi Penyebab Longsor di Batu". *Sainstek*. 5 (3). Universitas Negeri Gorontalo.
- [3] Shieh, Chieng-Lun dan Yu Shiu Chen. 2006. *Rainfall Criteria Variation of Debris Flow Occuring, Disaster Mitigation of Debris Flow, Slope Failure and Landslide*. Tokyo: Universal Academy Press.
- [4] Huang, Ching-Jer dan Hsiao-Yuen Yin. 2007. "Ground Vibration Produced by Rocks Motions and Debris Flow". *Journal of Geophysics Research*. Vol. 112.
- [5] Arattano, Massimo dan Lorenzo Marchi. 2009. "System and Sensors for Debris Flow Monitoring and Warning". *Journal Sensors Turino Italy*.
- [6] Puslitbang Sumber Daya Air. 2010. "Pengembangan Teknologi Sistem Peringatan Dini Terjadinya Debris Flow di Daerah Gunung Semeru". Studi Perencanaan Fasilitas Peringatan Dini Bencana Aliran Lahar Dingin.
- [7] Sugito, Zaroh Irayani, dan Indra Permana Jati. 2010. "Investigasi Bidang Gelincir Tanah Longsor Menggunakan Metode Geolistrik Tahanan Jenis di Desa Kebarongan, Kec. Kemranjen, Kabupaten Banyumas". *Berkala Fisika* 13 (2) : 49–54.
- [8] Storm Shield. 2007. *Windspeed to Conversion Pressure Chart*. <http://www.alutech.net.au/product-specs/stormshield-brosure.pdf>.