

STUDI SIMULASI MONITORING DEFORMASI TANAH SEBAGAI INDIKATOR BAHAYA LETUSAN GUNUNG API UNTUK PENGAMBILAN KEPUTUSAN DARURAT BENCANA

Mohamad Andy Herlambang

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

E-mail : Andy_herlambang@yahoo.com

Abstrak

Penelitian skripsi ini mempelajari korelasi antara deformasi tanah sebagai salah satu indikator bahaya letusan dan peluang letusan dengan memanfaatkan aplikasi *Eruption* untuk mensimulasikan bencana letusan yang melibatkan 12 orang responden mahasiswa strata satu. Fokus penelitian ini adalah monitoring laju deformasi tanah melalui simulasi bencana sebagai basis pengambilan keputusan darurat yang cepat dan tepat berupa tindakan evakuasi penduduk berdasarkan informasi terukur yang diberikan oleh tiga instrumen monitoring aktivitas vulkanik, yaitu *geodimeter* mengukur laju deformasi tanah, *seismometer* mengukur frekuensi gempa vulkanik, dan *cospec* mengukur emisi gas SO₂. Tujuan penelitian ini adalah melatih keterampilan mengambil keputusan darurat kepada mahasiswa strata satu sebagai bagian dari upaya peningkatan kesadaran tanggap bencana kebumiharian warga kampus. Temuan utama penelitian skripsi ini adalah: (1) deformasi tanah dipicu oleh peningkatan aktivitas magmatik yang merambatkan gelombang seismik di bawah permukaan tanah sebagai medium elastik; (2) peningkatan indikator bahaya letusan dibarengi dengan membesarnya peluang letusan, meskipun peran laju deformasi tanah tidak begitu dominan; (3) keputusan darurat bencana berupa tindakan evakuasi oleh semua responden menghasilkan rata-rata 45% total penduduk dapat diselamatkan dan 27% total dana yang tersedia terpakai untuk biaya operasional evakuasi.

Kata Kunci: deformasi tanah, *geodimeter*, *eruption*.

Abstract

This research examines the correlation between ground deformation as one of volcanic eruption indicators and the probability for the eruption to occur using *Eruption*, an on-line free software to simulate volcanic eruption with the help of 12 undergraduate third-year physics students as respondents. The study focuses on rates of ground deformation monitoring by running the program for disaster simulation as a mechanism of emergency decision making to evacuate people living surrounding the volcano. The decision is based on information given by three monitoring instruments for magmatic activities: *geodimeter* for the rate of ground deformation, *cospec* for level of SO₂ emission and *seismometer* for volcanic earthquake frequency. The aims of this study is therefore to introduce emergency decision making skill to university physics students as part of efforts for improvement of public awareness of geophysical hazards. The primary research findings are as follows: (1) ground deformation is due to an increase in magmatic activities causing the propagation of seismic waves below the surface; (2) the higher the level of eruption indicators, the larger the probability of eruption to occur; and (3) for all the decisions collected, lives saved is 45% of total population with a total of 27% operational cost taken from funds available.

Keywords: ground deformation, *geodimeter*, *eruption*.

Universitas Negeri Surabaya

PENDAHULUAN

Indonesia berada pada posisi geografis dengan kondisi geologis yang kaya deretan gunung api aktif, oleh karena itu sangat rentan mengalami bencana letusan. Meskipun demikian, belum ada upaya terpadu untuk memasukkan pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana dalam struktur kurikulum fisika universitas sebagai cara efektif untuk mengurangi dampak dan resiko letusan gunung api melalui pembelajaran terkait sains bencana.

Dengan memperhatikan aspek multi disiplin yang relevan, penelitian ini mempelajari relevansi antara deformasi permukaan tanah sebagai indikator bahaya letusan dan peluang terjadinya bencana letusan dengan

memanfaatkan aplikasi *Eruption* untuk mensimulasikan bencana letusan gunung api yang melibatkan 12 orang responden mahasiswa fisika. Fokus penelitian ini adalah simulasi monitoring indikator bahaya letusan untuk menetapkan status bencana letusan yang diperlukan sebagai bagian dari mekanisme terstruktur pengambilan keputusan darurat tanggap bencana yang cepat dan tepat berupa tindakan evakuasi penduduk berdasarkan informasi terukur yang diberikan oleh tiga buah instrumen monitoring terpadu aktivitas vulkanik, yaitu *seismometer* mengukur frekuensi gempa vulkanik, *cospec* mengukur kadar emisi gas SO₂, dan *geodimeter* mengukur deformasi permukaan tanah. Hipotesa penelitian adalah semakin

tinggi level indikator bahaya letusan, maka semakin besar pula peluang terjadinya bencana letusan.

Dalam konteks tersebut di atas, maka permasalahan dalam penelitian ini adalah mengetahui peran hukum mekanika dalam proses letusan gunung api dengan melihat indikator letusan berupa deformasi fisis lapisan tanah sebagai mekanisme pengambilan keputusan. Dengan bantuan aplikasi *Eruption* yang digunakan untuk pengambilan data dapat dijadikan acuan bahwa hukum mekanika yang terjadi pada peningkatan aktivitas gunung api yang memicu terjadinya tanah mengalami deformasi, melalui informasi tersebut dapat menganalisis mekanisme dari pengambilan keputusan tersebut.

Upaya terpadu studi mitigasi dan pengelolaan bencana seharusnya melibatkan masyarakat akademis baik dosen dan mahasiswa dalam bentuk penelitian terpadu tentang studi kebencanaan seperti dilakukan di berbagai negara. Salah satu terobosan yang diyakini mampu memberikan kontribusi dalam mereduksi dampak dan resiko bencana kebumihan adalah pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana melalui pembelajaran sains bencana kebumihan untuk semua jenjang pendidikan baik pendidikan dasar, menengah maupun tinggi.

Pembelajaran sains bencana kebumihan dalam pengajaran klasikal dengan pemanfaatan komputer sebagai alat bantu pengajaran (*computer-aided instruction*). Secara umum, pembelajaran ini berbasis simulasi komputer untuk melatih beberapa keterampilan hidup (*life skills*) yang relevan dengan upaya peningkatan kesadaran dan kesiagaan terhadap potensi bahaya bencana, yaitu berpikir kritis dan logis dalam mengambil keputusan. Melalui metode High Order Thinking Skills (HOTS), mendiskusikan pembelajaran berbasis *web* dan komputer yang digunakan untuk mensimulasikan bencana letusan gunung api dan menitikberatkan aspek kemandirian individu dalam hal pengambilan keputusan darurat secara cepat dan tepat berbasis informasi yang terukur dan akurat.

Simulasi informasi status bahaya bencana berasal dari tiga indikator bahaya letusan, yaitu frekuensi gempa vulkanik, kadar emisi gas SO_2 dan deformasi permukaan tanah. Program yang digunakan untuk melatih keterampilan mengambil keputusan berbasis HOTS sebagai bagian dari mekanisme pemecahan masalah dapat diakses *on line* secara gratis di <http://www.dartmouth.edu/~earthsci/eruption>. *Eruption* mendeskripsikan peluang terjadinya letusan melalui simulasi bacaan ketiga indikator bahaya letusan yang disajikan dalam bentuk data numerik. Pengambilan keputusan darurat berupa tindakan evakuasi parsial atau total ditetapkan berdasarkan status bencana untuk mencegah dampak dan resiko bencana sampai sekecil mungkin.

Gunung api secara umum adalah istilah yang didefinisikan sebagai suatu sistem fisis saluran fluida panas (batuan dalam perut bumi atau biasa disebut dengan magma yang meleleh menjadi cair dan biasa disebut dengan lava) yang memanjang vertikal dari kedalaman belasan kilometer di bawah permukaan bumi

sampai ke permukaan bumi, termasuk endapan akumulasi bermacam material vulkanik yang dikeluarkan melalui lubang kepundan saat letusan. Pada kedalaman tertentu, tekanan dan suhu magma yang sangat tinggi mampu melelehkan batuan magma. Saat batuan magma meleleh, cairan kental dan gas berbagai jenis dihasilkan membentuk sistem magma.

Magma yang berbentuk cairan kental dan gas berbagai jenis sedikit demi sedikit bergerak naik ke permukaan bumi karena massanya yang lebih ringan dibandingkan dengan batuan di sekelilingnya. Saat magma bergerak naik, magma tersebut melelehkan batuan yang bergesekan dengannya, sehingga terbentuklah magma chamber yang besar pada kedalaman beberapa kilometer di bawah permukaan bumi. Magma chamber ini merupakan deposit material vulkanik yang bertekanan dan bertemperatur tinggi.

Dalam waktu yang cukup lama, akumulasi tekanan dan temperatur yang tinggi dapat menyebabkan keretakan pada batu-batuan rapuh yang menjadi dinding magma chamber. Magma cair dan gas bergerak keluar melalui saluran retak menuju ke permukaan bumi. Saat fluida magma mendekati permukaan, kandungan gas terlepas bersamaan dengan letusan pertama yang membentuk lubang yang disebut lubang utama (*central vent*). Sebagian besar material vulkanik dihamburkan keluar melalui lubang utama selama letusan gunung api dan setelah semburan material vulkanik berhenti, kawah (*crater*) terbentuk pada bagian puncak dari gunung api tersebut.

Aktivitas magma gunung api yang meningkat dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar gunung api, misalnya gempa bumi vulkanik dan rekahan lapisan tanah. Rekahan lapisan tanah bisa terjadi karena ada perambatan gelombang seismik baik primer maupun sekunder.

Mekanika adalah salah satu cabang ilmu fisika yang mempelajari perubahan keadaan gerak (*change in state of motion*) atau perubahan bentuk (deformasi fisis) suatu benda yang dipicu oleh gangguan mekanik berupa gaya luar yang bekerja pada benda tersebut. Dalam mekanika, peristiwa deformasi merupakan terapan Hukum Hooke yang menyatakan bahwa semakin besar *stress* yang bekerja pada medium elastik (lapisan tanah), maka semakin besar pula *strain* yang terjadi. Besaran *stress* dan *strain* merupakan dua besaran fisika yang relevan dengan peristiwa deformasi fisis lapisan tanah. Dalam hal ini, *stress* didefinisikan sebagai gaya per satuan luas penampang permukaan, sedangkan *strain* didefinisikan sebagai persentase perubahan panjang relatif dibandingkan dengan panjang awal.

proses rekahan permukaan tanah tidak terjadi seketika melainkan bertahap seiring dengan pemberian beban berkelanjutan dalam bentuk rambatan energi seismik dari sumber gempa, misalnya aktivitas magma gunung api. Oleh karena itu, rekahan permukaan tanah dapat dijadikan sebagai salah satu indikator penanda awal akan terjadinya letusan gunung api yang dapat diukur dengan *geodimeter* (Barclay *et al.*, 2011). Indikator bencana letusan gunung api lain bisa dalam bentuk data frekuensi gempa vulkanik dan level emisi gas SO_2 di atmosfer lokal.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Lab Elektronika Dasar, Instrumentasi dan Sains Kebumihan, Jurusan Fisika FMIPA Unesa dengan memberi pengetahuan awal pada 12 orang mahasiswa fisika sebagai responden penelitian tentang mekanisme dan prinsip dasar fisika yang mendasari letusan gunung api dan resiko bencana letusan terkait. Sesudah tahap awal ini, responden diberi informasi yang berkaitan dengan pengembangan kemampuan berpikir tingkat tinggi (kritis dan logis) sebagai dasar untuk mengambil keputusan darurat bencana yang cepat dan tepat dalam bentuk tindakan evakuasi penduduk parsial atau total. Teknik pengambilan keputusan yang cepat, tepat dan akurat berbasis informasi terukur indikator bahaya letusan oleh instrumen monitoring aktivitas gunung api yang disediakan oleh *Eruption* kemudian diperkenalkan. Pada akhir sesi ini, semua responden diberi kesempatan untuk menjalankan *Eruption* dengan pengawasan langsung.

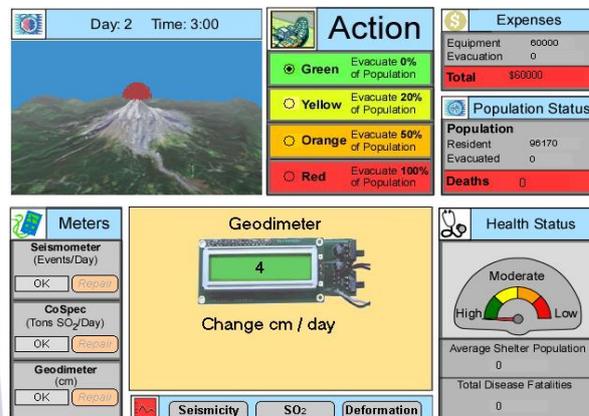
Teknik pengambilan keputusan darurat oleh responden harus mempertimbangkan sejarah letusan gunung api yang ditampilkan pada bagian *history* di halaman muka *Eruption* yang memberikan rentang bacaan indikator bahaya letusan. Status *low level* bila instrumen *seismometer* menunjuk nilai < 15 gempa/hari, *cospec* menunjuk nilai < 400 ton/hari dan *geodimeter* menunjuk nilai < 3 cm/hari. Status *mid level* bila *seismometer* menunjuk 16-30 gempa/hari, *cospec* menunjuk 401-750 ton/hari dan *geodimeter* menunjuk 4-6 cm/hari. Status *high level* bila *seismometer* menunjuk jumlah gempa > 30 gempa/hari, *cospec* menunjuk nilai > 750 ton/hari dan *geodimeter* menunjuk nilai > 6 cm/hari.

Keputusan darurat bencana yang diambil oleh responden dalam menentukan jumlah penduduk yang harus dievakuasi juga harus memperhitungkan keselamatan penduduk ketika berada dalam lokasi pengungsian dan biaya operasional yang diperlukan untuk memenuhi segala kebutuhan hidup, mengingat para pengungsi rentan mengalami penyakit jika sarana dan prasarana serta kondisi pengungsian tidak layak. Oleh sebab itu, tindakan darurat evakuasi penduduk harus mempertimbangkan keseimbangan antara jumlah penduduk yang dievakuasi dan biaya operasional yang dibutuhkan.

Gambar 1 merupakan tampilan antar muka *Eruption* yang menunjukkan pilihan persentase jumlah penduduk yang dievakuasi parsial atau total dibedakan dalam warna hijau, kuning, oranye dan merah. Warna-warna tersebut dapat diasosiasikan dengan keadaan *low level* untuk mengevakuasi 0-20% penduduk (hijau dan kuning), *mid level* untuk mengevakuasi 50% penduduk (oranye) dan *high level* untuk mengevakuasi total (merah). Tingkat pemahaman responden terhadap bacaan instrumen monitoring berpengaruh besar terhadap keberhasilan dalam mengambil keputusan darurat tindakan evakuasi penduduk yang efektif dan efisien.

Dua hal yang menjadi perhatian adalah respons alat ukur berupa hasil bacaan indikator letusan oleh tiga instrumen monitoring terpadu dalam *Eruption* dan respons responden berupa pengambilan keputusan darurat

tindakan evakuasi. Berdasarkan kedua hal tersebut, data penelitian diperoleh dari setiap responden yang menjalankan program *Eruption*, yaitu tabel simulasi pencatatan bacaan hasil ukur indikator bahaya letusan gunung api oleh ketiga instrumen monitoring dan tabel peluang terjadinya bencana letusan, serta grafik yang menunjukkan hubungan kualitatif antara persentase jumlah penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase total dana terpakai.



Gambar 1. Interface aplikasi *Eruption* yang dapat diakses bebas di <http://www.dartmouth.edu/~earthsci/eruption>.

HASIL DAN PEMBAHASAN

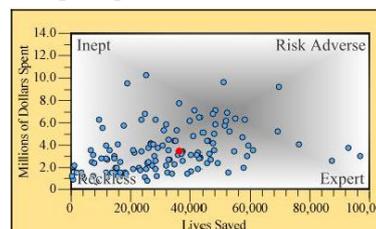
Sesuai dengan mekanisme pengambilan keputusan darurat bencana, di mana status bahaya bencana letusan ditetapkan berdasarkan hasil-hasil ukur indikator bahaya letusan oleh instrumen monitoring aktivitas gunung api untuk merancang tindakan evakuasi penduduk, maka hasil-hasil penelitian ini dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu: (1) hasil bacaan indikator bahaya letusan oleh tiga instrumen monitoring; dan (2) grafik keputusan darurat tindakan evakuasi.

Tabel 1 di bawah ini adalah contoh hasil bacaan indikator bahaya letusan oleh tiga instrumen monitoring dari salah satu responden penelitian.

Tabel 1. Korelasi bacaan instrumen dan peluang letusan.

Bacaan Geodimeter (cm/hari)	Bacaan Seismometer (gempa/hari)	Bacaan Cospec (ton/hari)	Jumlah kejadian sesuai bacaan semua instrumen	Jumlah kejadian tidak meletus	Peluang letusan (%)
0-3	0-15	0-400	13	10	23,1
4-6	16-30	401-750	19	11	42,1
> 6	> 30	> 750	16	7	56,3

Selain diperoleh Tabel 1 juga diperoleh gambar grafik antara jumlah penduduk yang selamat dengan biaya total yang terpakai seperti pada Gambar 2 berikut



Gambar 2. Hasil keputusan tindakan evakuasi oleh responden.

Lingkaran biru pada Gambar 2 adalah *background data* (data latar) yang berasal dari responden dalam Barclay *et al.* (2011). Sebaran data latar melebar dari kondisi ‘ceroboh’ sampai ‘ahli’. Pada bagian pembahasan, distribusi posisi lingkaran merah sebagai keputusan responden penelitian ini dibandingkan dengan distribusi data latar dari responden dalam Barclay *et al.* (2011) dan juga dengan hasil-hasil yang diperoleh oleh Nurfitriani (2014) dan Safitri (2014).

Tabel korelasi bacaan hasil ukur indikator bahaya letusan oleh semua instrumen monitoring dan oleh *geodimeter* saja terhadap peluang letusan dari semua responden diberikan berturut - turut pada Tabel 2 dan Tabel 3.

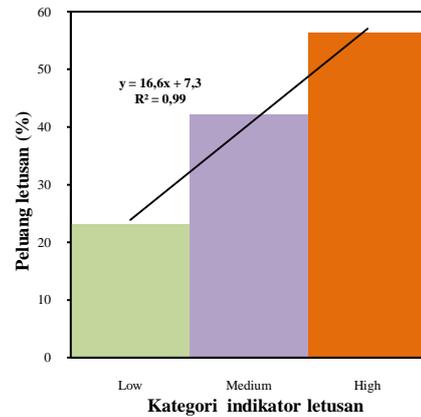
Tabel 2. Korelasi bacaan semua instrumen dan peluang letusan dari 12 responden.

Responden	Peluang letusan berdasarkan bacaan semua instrumen monitoring (%)		
	Low Level	Medium Level	High Level
A	23,1	42,1	62,5
B	23,1	42,1	56,3
C	15,4	31,6	56,3
D	23,1	36,8	62,5
E	23,1	57,9	43,8
F	15,4	52,6	43,8
G	23,1	36,8	56,3
H	0,0	47,4	62,5
I	7,7	36,8	43,7
J	23,1	42,1	43,7
K	15,4	36,8	50,0
L	15,4	31,6	56,3

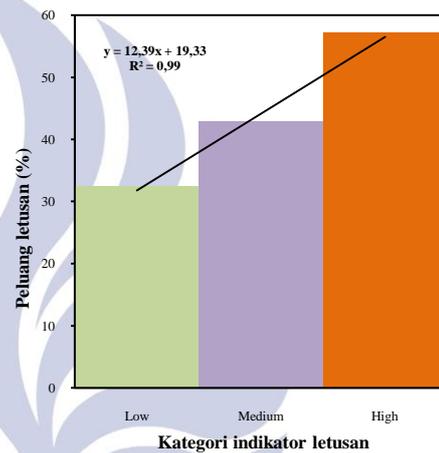
Tabel 3. Korelasi bacaan *geodimeter* dan peluang letusan dari 12 responden.

Responden	Peluang letusan berdasarkan bacaan Geodimeter (%)		
	0-3 cm/hari	4-6 cm/hari	> 6 cm/hari
A	45,5	25,0	57,1
B	38,2	42,9	57,1
C	32,4	14,3	71,4
D	42,4	25,0	57,1
E	42,9	42,9	50,0
F	35,3	57,1	42,9
G	32,4	42,9	57,1
H	34,3	50,0	80,0
I	22,9	57,1	50,0
J	38,2	28,6	57,1
K	32,4	42,9	42,9
L	32,4	14,3	71,4

Berdasarkan data pada Tabel 2 dan Tabel 3 di atas, kemudian dibuat diagram batang yang menggambarkan hubungan antara level indikator bahaya letusan dan peluang letusan seperti terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Pada kedua gambar tersebut level indikator bahaya letusan direpresentasikan dengan ‘*low level*’ untuk mengukur rekahan tanah dengan laju 0-3 cm/hari; ‘*medium level*’ dengan laju 4-6 cm/hari; dan ‘*high level*’ dengan laju > 6 cm/hari.



Gambar 3. Hubungan kategori indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan semua instrumen monitoring dari 12 responden.



Gambar 4. Hubungan kategori indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan *geodimeter* dari 12 responden.

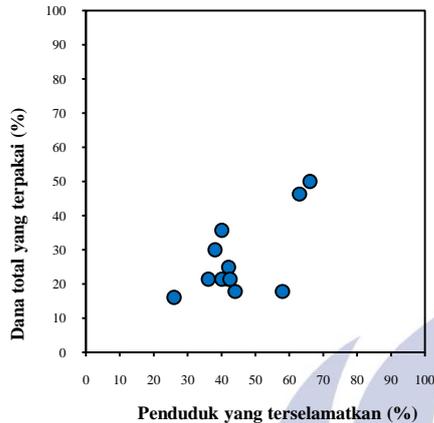
Analisa Grafik

Berdasarkan grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk yang serupa dengan Gambar 2 namun untuk semua responden (data lengkap ada pada Lampiran A-L), maka dibuat tabel korelasi antara persentase jumlah penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase dana total tersedia yang terpakai seperti terlihat pada Tabel 4.

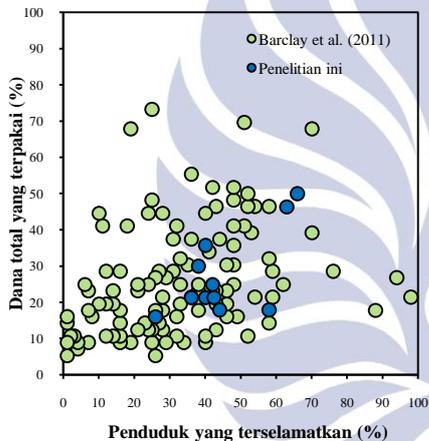
Tabel 4. Keputusan tindakan evakuasi penduduk dari 12 responden.

Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
A	42,0	21,4
B	36,0	21,4
C	44,0	17,9
D	42,0	25,0
E	38,0	30,0
F	58,0	17,9
G	40,0	21,4
H	66,0	50,0
I	40,0	35,7
J	63,0	46,4
K	26,0	16,1
L	42,5	21,4
Rerata	44,8	27,1

Selain tabel keputusan darurat yang cepat dan tepat dalam bentuk tindakan evakuasi penduduk, juga dapat dibuat grafik terkait yang berasal dari semua responden penelitian ini (Gambar 5) dan grafik yang sama dengan data latar dari responden dalam Barclay *et al.* (2011) sebagai perbandingan (Gambar 6).



Gambar 5. Keputusan tindakan evakuasi 12 responden.



Gambar 6. Keputusan tindakan evakuasi dari semua responden dengan data latar dari responden dalam Barclay *et al.* (2011).

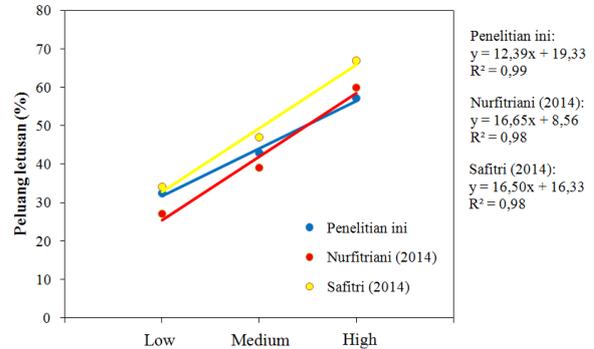
Gambar 6 di atas jelas menunjukkan bahwa distribusi lingkaran biru yang mendeskripsikan keputusan darurat tindakan evakuasi penduduk dari responden penelitian ini jatuh di 'wilayah distribusi' keputusan tindakan evakuasi dari responden Barclay *et al.* (2011). Hal ini bisa menjadi argumen yang baik bahwa hasil-hasil yang diperoleh dari responden penelitian ini dalam konteks keputusan darurat bencana adalah wajar dan masuk akal.

Diskusi Korelasi Indikator Bahaya Letusan dan Peluang Letusan

Fokus utama diskusi bagian ini adalah untuk menjawab hipotesa penelitian yang mengatakan bahwa ada korelasi positif antara peningkatan level indikator bahaya letusan dan peluang terjadinya bencana letusan. Dalam konteks penelitian sejenis dengan penelitian ini namun dengan fokus berbeda, Nurfitriani (2014) mempelajari aktivitas seismik gunung api dalam bentuk frekuensi gempa vulkanik dengan melibatkan 17 responden mahasiswa fisika strata satu dan Safitri (2014)

mempelajari level emisi SO_2 dengan melibatkan 16 responden mahasiswa sains strata satu.

Kemiringan garis lurus yang berbeda yang diperoleh pada deformasi tanah, frekuensi gempa, dan emisi gas SO_2 yang direpresentasikan dalam satu plot pada Gambar 7 merefleksikan *relative importance* dari masing-masing indikator bahaya letusan, yaitu frekuensi gempa vulkanik merupakan indikator utama dan bersifat dominan terhadap dua indikator letusan yang lain (emisi gas SO_2 dan deformasi tanah).



Gambar 7. *The relative importance* dari masing-masing indikator letusan.

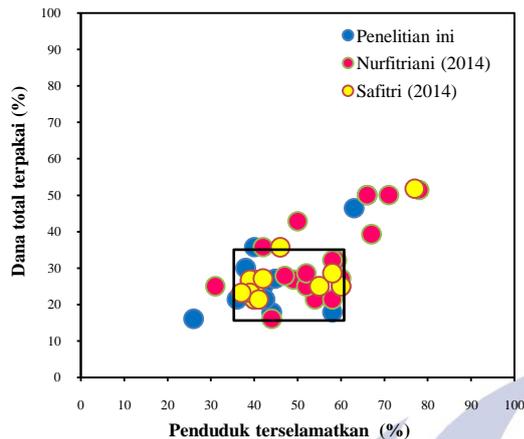
Gambar 7 menceritakan bahwa frekuensi gempa vulkanik yang diukur oleh *seismometer* (merah) dengan kemiringan paling tajam merupakan indikator utama bahaya letusan dan bersifat dominan terhadap dua indikator bahaya letusan lain, yaitu emisi gas SO_2 yang diukur oleh *cospec* (kuning) dan deformasi tanah yang diukur oleh *geodimeter* (biru) dengan kemiringan yang lebih rendah.

Kemiringan garis yang berbeda pada Gambar 7 tersebut juga menceritakan bahwa baik indikator bahaya letusan yang diukur oleh semua instrumen monitoring maupun oleh salah satu instrumen (*seismometer*, *cospec* atau *geodimeter*) memberikan tafsiran fisis yang sama. Peningkatan level indikator bahaya letusan dari keadaan *low level* menuju ke *medium level* kemudian menuju ke *high level* berkontribusi langsung pada peluang bencana letusan. Semakin tinggi level indikator bahaya letusan, semakin besar peluang terjadinya bencana letusan.

Dengan tiga plot garis pada Gambar 7 tersebut di atas, maka hipotesa penelitian terjawab yaitu ada korelasi positif antara indikator bahaya letusan dan peluang terjadinya bencana letusan. Hal ini sangat penting dalam mekanisme pengambilan keputusan darurat tanggap bencana yang cepat dan tepat untuk mengevakuasi penduduk di wilayah letusan gunung api yang didahului oleh penetapan status bahaya bencana melalui pengamatan langsung indikator bahaya letusan oleh instrumen monitoring aktivitas vulkanik.

Selain tabel korelasi hasil bacaan indikator bahaya letusan oleh tiga instrumen monitoring terhadap peluang terjadinya bencana letusan (Tabel 1), peneliti juga memperoleh grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk yang menunjukkan hubungan antara persentasi populasi yang terselamatkan dan persentasi total dana yang terpakai untuk biaya operasional tindakan evakuasi seperti dapat dilihat pada Gambar 8. Agar perbandingan antara temuan penelitian ini dan hasil yang diperoleh oleh

Nurfitriani (2014) dan Safitri (2014) menjadi jelas, maka sekali lagi dibuat *overlay graphical data* untuk semua responden dalam penelitian ini dengan data latar dari kedua peneliti tersebut seperti terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Keputusan tindakan evakuasi dari 12 responden dengan data latar dari responden Nurfitriani (2014) dan Safitri (2014).

Selain menunjukkan pola yang sama, distribusi posisi lingkaran berwarna hasil keputusan tindakan evakuasi untuk semua responden yang terlibat dalam penelitian ini, Nurfitriani (2014) dan Safitri (2014) memberikan wilayah kotak yang berisi paling banyak lingkaran berwarna. Kotak hitam tersebut berfungsi sebagai ‘modus’ yang memberi estimasi ketakpastian hasil percobaan keputusan tindakan evakuasi penduduk.

Selain berfungsi sebagai modus, kotak hitam pada Gambar 8 tersebut memberikan prediksi pengambilan keputusan darurat yang akan diberikan oleh responden baru di luar responden penelitian ini. Peluang terbesar menemukan posisi lingkaran berwarna sebagai hasil percobaan keputusan tindakan evakuasi oleh responden baru yang dipilih secara random adalah berada dalam wilayah kotak hitam tersebut. Konfirmasi tentang hal ini berasal dari beberapa responden baru yang menjalankan program *Eruption*, di mana 75% dari hasil percobaan keputusan tindakan evakuasi jatuh pada wilayah kotak hitam pada Gambar 8.

Berdasarkan *grid lines* yang telah dibuat, untuk penelitian ini diperoleh hasil sebagai berikut: rata-rata jumlah penduduk yang dapat diselamatkan saat evakuasi adalah $45 \pm 12\%$ dengan $27 \pm 7\%$. Hasil penelitian ini tidak jauh berbeda dengan hasil yang diperoleh oleh Safitri (2014) yang berhasil menyelamatkan $47 \pm 12\%$ populasi total dengan biaya mencapai $27 \pm 7\%$ dari dana total yang tersedia, namun agak jauh berbeda dengan hasil yang diperoleh oleh Nurfitriani (2014) yang melaporkan populasi terselamatkan sebesar $55 \pm 12\%$ dengan biaya operasional mencapai $32 \pm 7\%$ dari dana total tersedia. Berdasarkan estimasi ketakpastian hasil percobaan jelas terlihat bahwa ada *overlapping results* diantara hasil penelitian ini dan hasil-hasil yang diperoleh oleh kedua peneliti tersebut di atas. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara temuan penelitian ini, Safitri (2014) dan Nurfitriani (2014).

Penutup

Simpulan

Dengan memperhatikan semua data simulasi bencana letusan yang berasal dari 12 orang responden mahasiswa strata satu dalam penelitian skripsi ini, maka berikut ini adalah beberapa temuan utama penelitian:

1. Deformasi tanah bisa disebabkan oleh adanya peningkatan aktivitas magmatik gunung api atau peningkatan aktivitas seismik dinamika lempeng tektonik dalam bentuk perambatan gelombang seismik di bawah permukaan tanah sebagai medium elastik;
2. Semakin tinggi level indikator letusan maka semakin besar peluang letusan, namun pengaruh laju rekahan tanah tidak begitu dominan;
3. Keputusan darurat tanggap bencana yang cepat, tepat, dan akurat berdasarkan informasi yang diberikan oleh instrumen monitoring dalam simulasi bencana memberikan hasil 45% jiwa terselamatkan dengan biaya operasional 27% dari dana total yang tersedia.

Saran

Pada saat pelaksanaan kegiatan penelitian skripsi ini, ada dua kesulitan teknis yang ditemui, yaitu: (1) akses internet yang lambat dan tidak stabil di area Laboratorium Elektronika Dasar dan Instrumentasi, Jurusan Fisika FMIPA Unesa menyulitkan mengakses program *Eruption* sebagai instrumen utama penelitian yang berbasis *web* dan *on-line running*; dan (2) ketersediaan data lapangan aktivitas gunung api aktif di Indonesia di situs resmi PVMBG sebagai badan yang relevan dengan masalah-masalah vulkanologi dan mitigasi bencana kebumih-masih minim dan tidak memberikan rincian aktivitas magmatik terkait dengan indikator bahaya letusan. Dua kelemahan teknis di atas adalah berada di luar kontrol peneliti.

Daftar Pustaka

- Building Research Institute (BRI) and National Graduate Institute for Policy Studies. 2007. *Disaster Education*. Paris: Section for Disaster Reduction UNESCO.
- Barclay, E. J., Renshaw, C. E., Taylor, H. A. and Bilge, A. R. 2011. Improving decision making skill using an online volcanic crisis simulation: impact of data presentation format. *Journal of Geoscience Education*, Vol. 59, 85-92.
- Harpp, K. S. and Sweeney, W. J. 2002. Simulating a volcanic crisis in the classroom. *Journal of Geoscience Education*, Vol. 50, 410-418.
- Nurfitriani, D. I. 2014. *Monitoring frekuensi gempa vulkanik dengan memanfaatkan simulasi letusan gunung berapi sebagai basis keterampilan mengambil keputusan*. Skripsi. Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Surabaya. tidak dipublikasikan.
- Safitri, A. E. 2014. *Simulasi Emisi Gas SO₂ Sebagai Indikator Letusan Gunung Berapi Untuk Merancang Tindakan Evakuasi*. Skripsi. Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Surabaya. tidak dipublikasikan.