

MONITORING GEMPA BUMI VULKANIK DENGAN MEMANFAATKAN SIMULASI BENCANA LETUSAN GUNUNG BERAPI UNTUK MELATIHKAN TINDAKAN EVAKUASI

Dewi Indah Nurfitriani

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya
dewi@yahoo.com

Abstrak

Posisi geografis dan kondisi geologis Indonesia menghasilkan deretan gunung api, oleh karena itu rawan mengalami bencana letusan. Meskipun telah banyak upaya dilakukan oleh pemerintah dan lembaga non-pemerintah serta elemen masyarakat untuk mengurangi dampak dan resiko bencana letusan, namun hampir semua upaya tersebut belum membuahkan hasil yang optimal. Pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana memiliki kata kunci pencegahan. Dalam konteks ini, studi mitigasi dan pengelolaan bencana kebumian perlu diintegrasikan ke dalam struktur kurikulum fisika universitas sebagai salah satu solusi alternatif untuk program pengurangan resiko bencana. Penelitian ini mempelajari korelasi antara indikator bahaya letusan dan peluang letusan dengan memanfaatkan aplikasi *Eruption* untuk mensimulasikan bencana letusan gunung api yang melibatkan 17 orang responden. Fokus penelitian adalah monitoring frekuensi gempa vulkanik melalui simulasi bencana sebagai basis pengambilan keputusan darurat tindakan evakuasi penduduk yang cepat dan tepat berdasarkan informasi terukur yang diberikan oleh instrumen monitoring aktivitas vulkanik, yaitu *seismometer* mengukur frekuensi gempa vulkanik, *cospec* mengukur emisi SO₂, dan *geodimeter* mengukur deformasi tanah. Tujuan penelitian adalah melatih keterampilan mengambil keputusan darurat kepada mahasiswa strata satu sebagai bagian dari warga kampus terdidik yang kelak akan menjadi anggota masyarakat. Temuan utama penelitian adalah sebagai berikut: (1) frekuensi gempa vulkanik merupakan indikator utama letusan; (2) peningkatan level indikator letusan, terutama frekuensi gempa vulkanik, diikuti oleh membesarnya peluang letusan; (3) keputusan darurat tindakan evakuasi oleh 17 responden menghasilkan rata-rata 55% dari total penduduk dapat diselamatkan dengan biaya operasional mencapai 32% dari total dana yang tersedia.

Kata Kunci: mitigasi bencana, frekuensi gempa vulkanik, *Eruption*.

Abstract

Due to its geographical position and geological condition, Indonesia is a place for a series of active volcanoes and thus potential to volcanic eruption. Much effort currently organised by both governmental and non-governmental bodies for reducing disaster risks have been done, but only a little is achieved. Mitigation and disaster management put all attention to maximising public awareness and minimising disaster risks in the first place. In this context, the study of mitigation and disaster management should be included into a university physics curriculum as a solution to national program for disaster risk reduction. This research therefore examines the correlation between indicators of magmatic activities and the probability for volcanic eruption to occur using an on line software called *Eruption* to simulate volcanic eruption with 17 physics students involved as repondences. The study focuses upon earthquake frequency monitoring by running the program for disaster simulation as a mechanism of emergency decision making skill in terms of 'real action' to evacuate people living near the volcano. The action is based on information measured by three monitoring instruments for volcanic activities: *seismometer* for measurements of earthquake frequency, *cospec* for SO₂ emission, and *geodimeter* for ground deformation. The aims of this study is therefore to introduce emergency decision making skill to university physics students as part of education processes before engaging in a social life. The main research findings are then as follows: (1) volcanic earthquake frequency is the primary indicator of volcanic eruption; (2) an increase in the level of one or more indicators is parallel with an increase in potential threats of volcanic eruption; and (3) from all the data obtained lives saved is, on average, 55% of total population with a total of 32% operational cost spent.

Keywords: mitiation of disaster, volcanic earthquake frequency, *Eruption*

PENDAHULUAN

Salah satu isu strategis nasional yang harus ditangani segera oleh berbagai komponen bangsa baik dalam skala lokal maupun regional saat ini adalah kesadaran dan kesiagaan masyarakat yang masih rendah terhadap

bencana alam seperti gempa bumi dan letusan gunung berapi. Banyaknya gunung berapi di wilayah Indonesia adalah konsekuensi geologis dari posisi geografis Indonesia yang terletak di antara tiga lempeng tektonik besar, yaitu: Lempeng Euro-Asia, Lempeng Australia, dan Lempeng India. Dengan mempertimbangkan kondisi

geologis dan posisi geografis yang memberikan potensi ancaman bahaya letusan gunung berapi sewaktu-waktu, maka diperlukan upaya terpadu untuk mengurangi dampak dan resiko bencana. Dibutuhkan peran dari semua komponen bangsa dalam berbagai level mulai dari pemangku jabatan dan pengambil kebijakan sampai pada masyarakat akademik dan awam serta lembaga pemerintah pusat dan daerah.

Salah satu upaya terobosan edukatif untuk mereduksi dampak dan resiko bencana kebumihan adalah penyertaan studi mitigasi dan pengelolaan bencana dalam struktur kurikulum melalui pembelajaran sains bencana untuk semua jenjang pendidikan formal (Bladh, 1990; Smith *et al.*, 1995; Hodder, 1999). Pembelajaran sains bencana di sekolah dapat dipadukan dengan pemanfaatan komputer dan media sebagai alat bantu pengajaran seperti dibahas oleh Mayer dan Moreno (2002) dan sekarang ini menjadi *trend setter* di kalangan akademisi yang bergerak dalam dunia pendidikan dan pengajaran sains terpadu untuk semua jenjang sekolah. Fokus metode pembelajaran sains bencana adalah melatih keterampilan hidup yang relevan dengan upaya peningkatan kesadaran dan kesiagaan terhadap potensi bahaya bencana, yaitu berpikir kritis dan logis dalam pengambilan keputusan darurat (Taylor *et al.*, 1997; Renshaw *et al.*, 1998). Aspek yang ingin ditekankan dalam metode ini adalah kemandirian dan tanggap terhadap situasi darurat yang dipicu oleh bencana kebumihan.

Sejalan dengan perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang memicu *Technology-Enhanced Instruction* (TEI), maka pembelajaran fisika dan sains kebumihan level universitas berkembang secara efektif melalui pengajaran berbantuan komputer dan berbasis *on line* untuk mensimulasikan berbagai fenomena alam yang relevan dengan bencana kebumihan. Dalam hal ini, pendidikan mitigasi bencana diperkenalkan dan diajarkan melalui simulasi letusan gunung berapi dengan bantuan perangkat lunak *Eruption* yang bisa diakses bebas (Barclay *et al.*, 2011). Perangkat lunak *Eruption* memberikan respons terhadap masukan berupa tiga indikator bencana letusan gunung berapi, yaitu frekuensi gempa vulkanik, level emisi gas SO₂ dan deformasi fisis tanah. Ketiga indikator bencana letusan tersebut diberikan oleh tiga instrumen terpadu yang biasa digunakan untuk memonitor aktivitas gunung berapi, yaitu: *seismometer*, *cospec*, dan *geodimeter* (Harpp and Sweeney, 2002; Barclay *et al.*, 2011). Berbasis pembacaan tiga instrumen monitoring tersebut, maka status bencana ditetapkan dengan mempertimbangkan kombinasi tiga parameter dinamik yang berasal dari aktivitas magmatik gunung berapi, kemudian diikuti oleh tindakan nyata dalam bentuk proses evakuasi penduduk untuk mencegah dan mereduksi resiko bencana letusan gunung berapi.

Berdasarkan uraian di atas, terlihat bahwa ada kebutuhan mendasar untuk memahami sains mitigasi dan pengelolaan bencana, bukan saja untuk mereduksi korban jiwa melainkan juga sebagai upaya untuk memahami cara kerja alam. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji prinsip fisika yang bertanggung jawab terhadap proses sains di balik peristiwa bencana letusan gunung berapi (sebagai contoh bencana kebumihan yang sering terjadi di Indonesia) dan mengkaji efektivitas perangkat lunak *Eruption* dengan tampilan antar muka informasi numerik dalam menunjang proses pengambilan keputusan yang cepat, tepat, dan akurat. Hipotesis penelitian ini adalah peningkatan frekuensi gempa vulkanik (diukur oleh instrumen *seismometer* dalam aplikasi *Eruption*) yang disebabkan oleh peningkatan aktivitas magmatik dapat memperbesar peluang terjadinya letusan yang menjadi dasar penetapan status bencana dan pengambilan keputusan tindakan darurat evakuasi penduduk baik parsial maupun total di sekitar wilayah bencana letusan gunung berapi.

Kirkland (2010) menyatakan bahwa fisik gunung berapi merupakan timbunan material batuan cair yang kental (*molten rock*) dan gas berbagai jenis yang bertekanan dan bertemperatur tinggi (terutama solfatara) yang berasal dari bagian perut bumi (magma) yang mungkin meletus sewaktu-waktu. Letusan gunung berapi sebetulnya merupakan bukti peningkatan aktivitas magmatik gunung berapi yang didominasi oleh aliran cairan kental dari lubang kepundan yang biasa disebut dengan lava dan semburan material vulkanik membentuk awan *tephra* berisi padatan berbagai ukuran dan gas emisi berbagai jenis, dan aliran piroklastik.

Gempa vulkanik dipicu oleh peningkatan aktivitas magmatik, untuk semua kasus letusan gunung berapi yang pernah terjadi, selalu ada penanda awal berupa gejala gempa vulkanik yang frekuensinya meningkat seiring dengan peningkatan aktivitas magmatik gunung berapi. Gejala peningkatan frekuensi gempa vulkanik inilah yang diamati oleh *seismometer* dalam simulasi letusan dengan memanfaatkan *Eruption*. Berdasarkan catatan sejarah gempa vulkanik dan letusan yang dipicu oleh peningkatan aktivitas magmatik inilah, maka ahli gunung berapi di Indonesia membagi gunung berapi menjadi tiga, yaitu: 1) Gunung berapi tipe A, yaitu Gunung berapi aktif dengan tingkat keaktifan tinggi yang tercatat pernah mengalami letusan sekurang-kurangnya satu kali sesudah tahun 1600; 2) Gunung berapi tipe B, yaitu Gunung berapi aktif dengan tingkat keaktifan *moderate*, sesudah tahun 1600 belum tercatat mengalami letusan lagi, namun masih menunjukkan aktivitas vulkanik, misalnya emisi gas solfatara; dan 3) Gunung berapi tidak aktif, namun masih menunjukkan gejala dan berpotensi letusan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian verifikasi yang membuktikan adanya korelasi positif antara peningkatan level indikator letusan dan peluang letusan. Rancangan penelitian adalah pemodelan mitigasi bencana letusan gunung berapi menggunakan program *Eruption* yang dapat diakses *on line* secara bebas di alamat situs <http://www.dartmouth.edu/~earthsci/eruption> (Barclay *et al.*, 2011). Program *Eruption* tersebut adalah simulasi komputer berbasis *web* selama periode 25 hari aktivitas magmatik gunung berapi yang menuju ke 'krisis vulkanik', suatu situasi di mana kehidupan ekosistem di sekitar wilayah gunung berapi terancam. Simulasi bencana letusan dengan menggunakan *Eruption* menggambarkan aktivitas gunung berapi, sehingga memudahkan peneliti dalam mengamati aktivitas gunung berapi tanpa harus melakukan pengamatan secara langsung.

Program aplikasi *Eruption* memberikan respons terhadap masukan dari tiga indikator utama bencana letusan gunung berapi, yaitu frekuensi gempa vulkanik, peningkatan level emisi gas vulkanik SO₂ per hari dan deformasi fisis (rekahan) lapisan tanah. Ketiga indikator tersebut diukur oleh tiga instrumen yang biasa digunakan untuk memonitor aktivitas gunung berapi, yaitu: *seismometer*, *cospec* dan *geodimeter*. Berbasis bacaan tiga instrumen monitoring, maka status bencana ditetapkan dengan mempertimbangkan kombinasi tiga parameter aktivitas gunung berapi yang kemudian diikuti oleh tindakan evakuasi penduduk untuk mencegah dan mereduksi resiko bencana letusan sampai sekecil mungkin.

Berdasarkan hal tersebut di atas, *Eruption* adalah salah satu sumber belajar alternatif yang sesuai untuk pembelajaran mitigasi dan pengelolaan bencana bagi mahasiswa fisika. Penekanan dalam penelitian ini lebih difokuskan pada kemampuan pengambilan keputusan yang cepat, tepat, dan akurat dalam menghadapi situasi darurat bencana. Keputusan yang cepat, tepat, dan akurat itu sendiri merupakan cermin dari kemampuan berpikir kritis dan logis dalam menghadapi masalah nyata. Dengan demikian, dalam penelitian ini mahasiswa fisika dilatih untuk berpikir kritis dan logis agar terampil mengambil keputusan strategis (cepat, tepat, dan akurat) sebagai bagian dari mekanisme pemecahan masalah nyata. Simulasi bencana letusan gunung berapi ini akan memberikan gambaran relevansi antara frekuensi gempa vulkanik sebagai salah satu indikator letusan gunung berapi dan peluang terjadinya letusan. Selain itu, respons mahasiswa fisika dalam pengambilan keputusan yang cepat, tepat, dan akurat terkait penetapan status bencana juga akan dipelajari.

Penelitian ini dilaksanakan dengan pendekatan pengajaran berbasis *web* dan simulasi komputer dengan bantuan program aplikasi *Eruption*. Sebelum pengambilan data penelitian dimulai, responden penelitian diberi penjelasan tentang langkah-langkah penggunaan aplikasi *Eruption* untuk mempelajari simulasi bencana letusan gunung berapi. Fokus penelitian adalah melatih kemampuan mengambil keputusan yang cepat, tepat, dan akurat berbasis informasi frekuensi gempa vulkanik yang diukur dengan menggunakan instrumen monitoring *seismometer*. Aspek berpikir tingkat tinggi, kritis dan logis, dalam mengambil keputusan menjadi penting karena keputusan yang cepat, tepat, dan akurat diperlukan dalam melakukan tindakan evakuasi penduduk untuk mereduksi korban jiwa dan harta benda sampai sekecil mungkin.

Dalam penelitian ini, 17 orang mahasiswa Kelas C Angkatan 2011 Prodi Pendidikan Fisika, Jurusan Fisika FMIPA bertindak selaku responden. Sebagai bagian dari masyarakat terdidik di kampus, mahasiswa harus dilatih untuk peka terhadap masalah-masalah sosial dan nyata yang terjadi di masyarakat, khususnya jika masalah-masalah sosial dan nyata tersebut masih berhubungan dengan latar belakang ilmu yang ditekuni di kampus. Respons mahasiswa dalam mengambil keputusan strategis yang cepat, tepat, dan akurat berbasis informasi yang terukur dari instrumen monitoring aktivitas vulkanik terkait status bencana menjadi perhatian dalam penelitian.

Penelitian ini bersifat *theoretical work* yang mensimulasikan letusan gunung berapi dengan bantuan program *Eruption*. Penelitian diawali dengan memberi pengetahuan awal kepada 17 orang mahasiswa Kelas C 2011 sebagai responden tentang letusan gunung berapi. Penjelasan difokuskan pada prinsip dasar fisika yang relevan dengan mekanisme perambatan gelombang seismik yang memicu peningkatan frekuensi gempa vulkanik untuk melatih kemampuan berpikir kritis dan logis sebagai bagian dari mekanisme pengambilan keputusan yang cepat, tepat, dan akurat dalam menghadapi situasi darurat saat bencana terjadi. Pengambilan keputusan adalah tindakan evakuasi penduduk (parsial atau total) oleh responden sebagai ahli vulkanologi kepada penduduk di wilayah sekitar gunung berapi. Dalam hal ini, tindakan evakuasi yang akan dilakukan harus mempertimbangkan keseimbangan antara jumlah penduduk yang dievakuasi, biaya operasional evakuasi, dan biaya hidup selama tinggal di pengungsian, serta ketersediaan fasilitas di pengungsian.

Data penelitian dapat diperoleh dari setiap responden yang menjalankan program *Eruption* yang memiliki 3 instrumen monitoring aktivitas gunung berapi. Dalam penelitian ini, fokus perhatian adalah bacaan hasil ukur frekuensi gempa bumi vulkanik sebagai indikator bahaya

letusan gunung berapi oleh *seismometer*. Pada akhir sesi menjalankan aplikasi *Eruption*, setiap responden membuat tabel hasil ukur indikator letusan gunung berapi: frekuensi gempa vulkanik oleh *seismometer*, emisi gas SO₂ oleh *cospec*, dan rekahan tanah oleh *geodimeter*. Berdasarkan data tabulasi yang menunjukkan bacaan hasil ukur indikator bencana letusan oleh semua instrumen monitoring aktivitas vulkanik dan peluang terjadinya letusan serta grafik pengambilan keputusan oleh responden, maka diperoleh statistik proporsi jumlah responden yang mengambil keputusan yang dapat digolongkan dalam 4 kategori ('ceroboh', 'ahli', 'tidak layak', dan 'rugi'). Keputusan strategis yang tergolong baik dan efektif adalah keputusan yang dapat menyeimbangkan jumlah penduduk yang bisa diselamatkan dan biaya pembelian instrumen serta biaya operasional evakuasi. Sasaran yang ingin diketahui dari data keputusan evakuasi oleh responden adalah rata-rata persentase jumlah penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase jumlah biaya operasional terpakai relatif terhadap total biaya yang tersedia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian ini pada dasarnya dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu: (1) bacaan indikator letusan oleh 3 instrumen monitoring; dan (2) grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk. Oleh karena itu, hasil-hasil penelitian pada bab ini disajikan dengan mengikuti urutan tersebut.

Sesudah semua responden penelitian (17 orang mahasiswa Kelas C 2011) diberi kesempatan untuk menjalankan program *Eruption* dan melakukan pencatatan data, maka diperoleh tabel korelasi bacaan hasil ukur indikator letusan oleh semua instrumen monitoring dan oleh *seismometer* sebagai perbandingan. Berdasarkan pembacaan hasil ukur indikator letusan, kemudian diperoleh tabel korelasi antara bacaan indikator letusan oleh semua instrumen dan oleh *seismometer* saja terhadap peluang terjadinya letusan yang diberikan oleh responden.

Tabel 1. Korelasi bacaan semua instrumen monitoring dan peluang letusan.

Bacaan Seismometer (gempa/hari)	Bacaan Cospec (ton/hari)	Bacaan Geodimeter (cm/hari)	Jumlah kejadian sesuai bacaan semua instrumen	Jumlah kejadian tidak meletus	Peluang letusan (%)
0-15	0-400	0-3	11	9	12,5
16-30	401-750	4-6	21	12	31,6
> 30	> 750	> 6	16	7	66,7

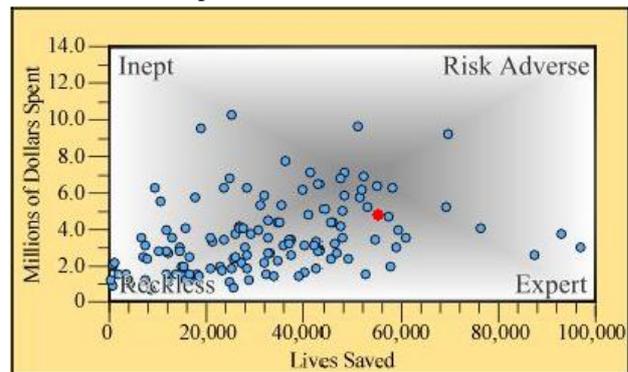
Tabel 2. Korelasi bacaan *seismometer* dan peluang letusan.

Bacaan Seismometer (Σ gempa/hari)	Jumlah kejadian sesuai bacaan Seismometer	Jumlah kejadian tidak meletus	Peluang Letusan (%)
0-15	15	9	40,0

Bacaan Seismometer (Σ gempa/hari)	Jumlah kejadian sesuai bacaan Seismometer	Jumlah kejadian tidak meletus	Peluang Letusan (%)
16-30	18	10	44,4
> 30	15	7	53,3

Meskipun baru satu data responden, namun ada gambaran bahwa baik bacaan hasil ukur indikator letusan oleh semua instrumen maupun oleh *seismometer* saja berkorelasi positif dengan peluang terjadinya letusan gunung berapi.

Seiring dengan diperolehnya Tabel 1 dan Tabel 2, maka peneliti juga memperoleh grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk yang menunjukkan hubungan antara populasi yang terselamatkan dan biaya operasional relatif terhadap biaya total yang tersedia (lingkaran merah). Gambar 1 berikut ini adalah contoh grafik yang berasal dari salah satu responden.

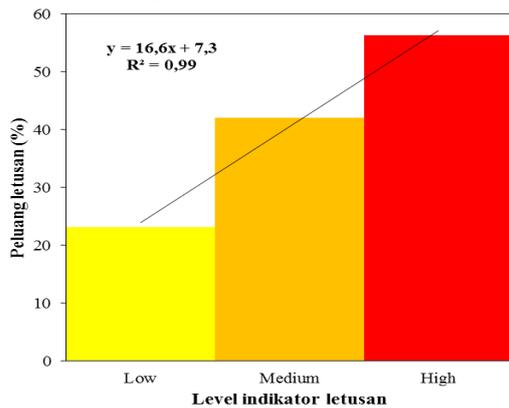


Gambar 1. Hasil keputusan tindakan evakuasi oleh responden.

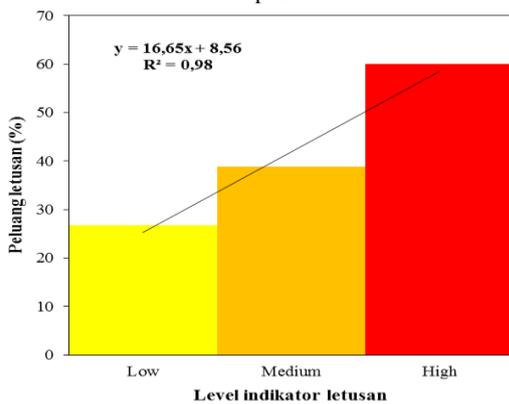
Data lingkaran biru pada Gambar 1 adalah *background data* (data latar) yang berasal dari responden dalam Barclay *et al.* (2011). Sebaran data latar adalah melebar dari kondisi 'ceroboh' sampai 'ahli'. Kesimpulan definitif belum bisa diambil hanya dengan melihat satu responden saja. Pada bagian pembahasan, distribusi posisi lingkaran merah sebagai keputusan responden penelitian ini akan dipelajari dan dibandingkan dengan distribusi data latar.

Selanjutnya dibuat tabel korelasi antara level indikator letusan terhadap peluang letusan. Dari tabel korelasi tersebut dapat dibuat sebuah diagram batang yang menggambarkan hubungan antara level indikator letusan dan peluang letusan seperti terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pada kedua gambar tersebut level indikator letusan direpresentasikan dengan 'low level' untuk frekuensi gempa vulkanik dalam rentang 0-15 gempa/hari; 'mid level' untuk frekuensi gempa vulkanik dalam rentang 16-30 gempa/hari; dan 'high level' untuk frekuensi gempa vulkanik > 30 gempa/hari. Meskipun ada perbedaan kecil kemiringan garis lurus yang menghubungkan titik tengah pada masing-masing batang berwarna kuning, oranye, dan merah pada Gambar 2 dan Gambar 3, namun secara prinsip kedua diagram batang menggambarkan hal yang

sama, yaitu peningkatan frekuensi gempa vulkanik menyebabkan peluang letusan membesar.



Gambar 2. Hubungan level indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan semua instrumen monitoring dari 17 responden.



Gambar 3. Hubungan level indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan *seismometer* dari 17 responden.

Berdasarkan grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk yang serupa dengan Gambar 1 namun untuk semua, maka dibuat tabel korelasi antara persentase populasi penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase dana total tersedia yang terpakai seperti terlihat pada Tabel 3 di bawah ini.

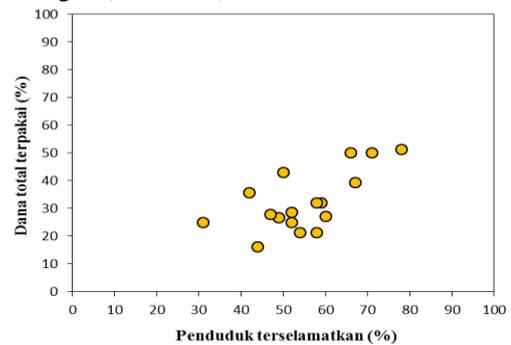
Tabel 3. Hasil keputusan tindakan evakuasi penduduk dari 17 responden.

Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
A	67,0	39,3
B	60,0	27,1
C	66,0	50,0
D	50,0	42,9
E	42,0	35,7
F	54,0	21,4
G	44,0	16,1
H	59,0	32,1
I	49,0	26,8
J	47,0	27,9
K	31,0	25,0

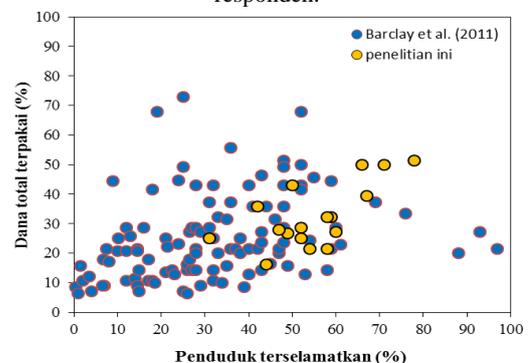
Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
L	71,0	50,0
M	58,0	32,1
N	78,0	51,4
O	52,0	25,0
P	52,0	28,6
Q	58,0	21,4
Rerata	55,2	32,5

Berdasarkan data pada Tabel 3 di atas, terlihat bahwa untuk 17 responden dalam penelitian rata-rata mengambil keputusan tindakan evakuasi, di mana 55% populasi dapat diselamatkan dengan biaya operasional mencapai 32% dari dana total yang disediakan. Hal ini wajar mengingat keputusan strategis yang diambil harus memperhitungkan aspek jiwa yang terselamatkan dan biaya operasional.

Selain tabel keputusan tindakan evakuasi penduduk, juga dapat dibuat grafik terkait yang berasal dari semua responden (Gambar 4) dan grafik yang sama dengan data latar dari Barclay *et al.* (2011) sebagai perbandingan (Gambar 5).



Gambar 4. Keputusan tindakan evakuasi dari semua responden.

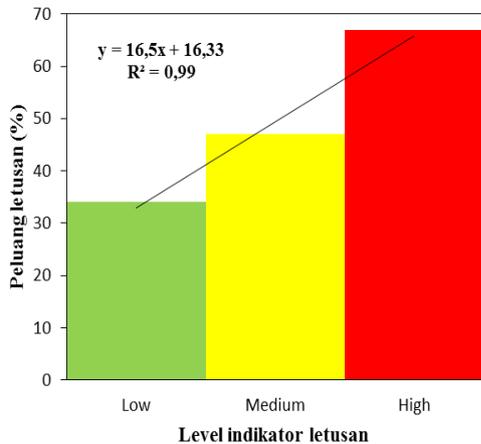


Gambar 5. Keputusan tindakan evakuasi dari semua responden dengan data latar dari responden dalam Barclay *et al.* (2011).

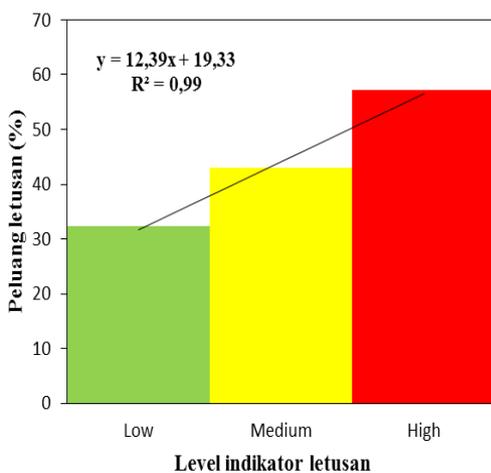
Dalam konteks penelitian yang sejenis dengan penelitian ini namun dengan fokus yang berbeda, Safitri (2014) mempelajari peningkatan level emisi gas SO₂ dengan melibatkan 16 responden dan Herlambang (2014)

mempelajari rekahan lapisan tanah dengan melibatkan 12 responden sebagai indikator bencana letusan gunung berapi dengan memanfaatkan program *Eruption*. Dengan metodologi yang sama, peneliti, Safitri (2014) dan Herlambang (2014) menemukan bentuk dan karakteristik diagram batang yang sama seperti Gambar 2. Hal ini berarti bahwa garis hubung titik tengah tiga diagram batang (hijau, kuning, dan merah) yang menunjukkan hubungan level indikator dan peluang letusan hasil pembacaan semua instrumen monitoring aktivitas magmatik memiliki kemiringan yang sama. Arti fisis dari temuan ini adalah semua instrumen memberikan kontribusi pada hasil-hasil ukur indikator letusan dan tidak ada cara untuk mengisolasi salah satu indikator dari indikator lainnya.

Namun diagram batang pada Gambar 3 yang dibuat dengan hanya memperhatikan bacaan level indikator letusan oleh *seismometer* saja memiliki kemiringan garis yang berbeda dengan Safitri (2014) dan Herlambang (2014).

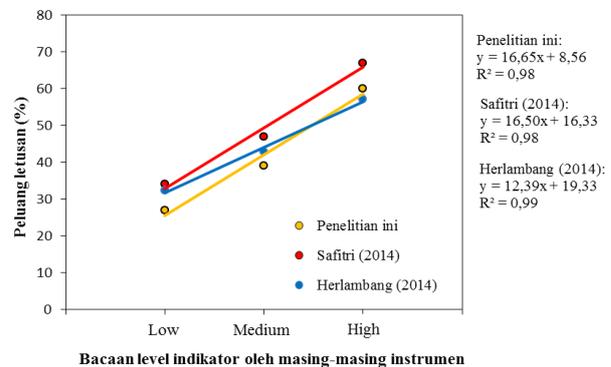


Gambar 6. Hubungan level indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan *cospec* dari 16 responden yang dilaporkan dalam Safitri (2014).



Gambar 7. Hubungan level indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan *geodimeter* dari 12 responden yang dilaporkan dalam Herlambang (2014).

Arti fisis dari temuan kemiringan garis yang berbeda pada Gambar 3, Gambar 6 dan Gambar 7 yang direpresentasikan dalam Gambar 8 adalah frekuensi gempa vulkanik merupakan indikator utama dan bersifat dominan terhadap dua indikator letusan yang lain (emisi gas SO_2 dan deformasi tanah). Namun demikian, yang paling penting dari diskusi bagian ini adalah bahwa baik indikator bahaya letusan diukur oleh semua instrumen monitoring maupun oleh salah satu instrumen monitoring saja (bisa *seismometer*, *cospec*, atau *geodimeter*) memberikan tafsiran fisis yang sama, yaitu peningkatan level indikator dari keadaan *low level* ke *mid level* dan menuju ke *high level* berkontribusi langsung pada membesarnya peluang bencana letusan. Hal ini sangat penting dalam mekanisme pengambilan keputusan strategis yang cepat, tepat, dan akurat untuk mengevakuasi penduduk yang didahului oleh penetapan status bencana melalui pengamatan indikator letusan. Dengan demikian, hipotesa penelitian ini terjawab yaitu ada korelasi positif antara indikator letusan dan peluang letusan.



Gambar 8. *The relative importance* dari masing-masing indikator letusan.

Berdasarkan grafik keputusan tindakan evakuasi penduduk dari semua responden penelitian, telah dibuat tabel terkait (Tabel 6) dan *overlay graphical data* dari semua responden dalam satu gambar saja (Gambar 4) serta dengan data latar (Gambar 5). Oleh karena penelitian ini juga dilakukan oleh dua peneliti lain meskipun dengan fokus berbeda, yaitu Safitri (2014) dan Herlambang (2014) maka sangat menarik bila temuan kedua peneliti tersebut juga dibandingkan dengan temuan penelitian ini.

Tabel 7. Hasil keputusan tindakan evakuasi penduduk dari Safitri (2014).

Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
A	39,0	26,4
B	40,0	26,8

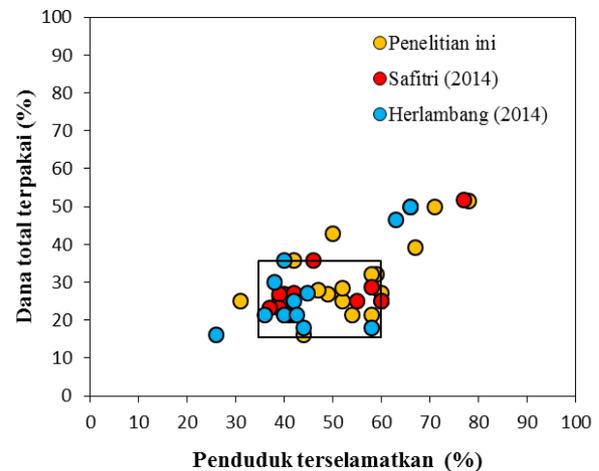
Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
C	40,0	21,4
D	39,0	25,0
E	36,0	25,0
F	58,0	25,0
G	40,0	26,8
H	56,0	25,0
I	41,0	23,2
J	55,0	25,0
K	42,0	35,7
L	48,0	51,8
M	78,0	21,4
N	37,0	23,2
O	38,0	27,1
P	58,0	28,6
Rerata	46,6	27,3

Tabel 8. Hasil keputusan tindakan evakuasi penduduk dari Herlambang (2014).

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

Terlihat dari Tabel 7 dan Tabel 8, tidak ada perbedaan yang signifikan antara temuan Safitri (2014) dan Herlambang (2014) bahwa sekitar 46% total populasi berhasil diselamatkan dengan dana total terpakai mencapai sekitar 27% .

Agar perbandingan antara temuan penelitian ini dan kedua peneliti tersebut menjadi jelas, maka sekali lagi dibuat *overlay graphical data* untuk semua responden dalam penelitian ini, Safitri (2014) dan Herlambang (2014) seperti terlihat pada Gambar 4.9 di bawah ini.



Gambar 9. Keputusan tindakan evakuasi dari semua responden dengan data latar dari responden Safitri (2014) dan Herlambang (2014).

Sekarang terlihat bahwa distribusi posisi lingkaran kuning (temuan dari responden penelitian ini), lingkaran merah (temuan dari responden Safitri, 2014) dan lingkaran biru (temuan dari responden Herlambang, 2014) memiliki pola yang sama, yaitu adanya korelasi positif antara persentase jumlah penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase biaya total yang terpakai dalam proses evakuasi penduduk. Kotak hitam pada Gambar 9 memberikan luasan wilayah yang berisi paling banyak lingkaran (modus data) dan memberikan estimasi ketakpastian percobaan pengambilan keputusan tindakan evakuasi penduduk. Kotak hitam tersebut memberikan prediksi posisi pengambilan keputusan darurat bencana yang akan diberikan oleh responden baru di luar responden penelitian ini. Peluang terbesar menemukan posisi lingkaran sebagai hasil keputusan tindakan evakuasi penduduk oleh seseorang sebagai responden baru yang dipilih secara random dari komunitas di luar responden pada penelitian ini adalah berada dalam wilayah kotak hitam tersebut.

Dengan membuat *horizontal and vertical grid lines* pada Gambar 9, maka diperoleh rata-rata persentase penduduk yang bisa diselamatkan dan rata-rata persentase dana total terpakai. Untuk penelitian ini, diperoleh rata-rata jumlah penduduk yang dapat diselamatkan adalah $55 \pm 12\%$ dengan biaya operasional tindakan evakuasi penduduk mencapai $32 \pm 7\%$ dari dana total yang disediakan. Sebagai bahan perbandingan, Safitri (2014) dan Herlambang (2014) menemukan bahwa $46 \pm 12\%$

populasi terselamatkan dengan biaya operasional mencapai $27\pm 7\%$ dari dana total tersedia. Berdasarkan estimasi ketakpastian hasil percobaan jelas terlihat bahwa ada *overlapping results* yang mengindikasikan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara temuan pada penelitian ini dan temuan pada penelitian Safitri (2014) dan Herlambang (2014). Hal inilah yang menjadi ‘kemenangan’ penelitian ini, karena ketiga penelitian tersebut menggunakan metodologi dan instrumen penelitian yang sama (aplikasi *Eruption*) dan melibatkan responden dengan usia rata-rata dan level pengetahuan kognitif yang sama (mahasiswa strata satu).

PENUTUP

Simpulan

Wilayah Indonesia secara geografis dan geologis terdiri dari deretan gunung berapi aktif, oleh karena itu rawan mengalami bencana letusan gunung berapi. Sampai dengan saat ini, belum ada upaya terpadu untuk mengatasi situasi tersebut. Salah satu cara efektif untuk turut berpartisipasi dalam upaya mereduksi dampak dan resiko letusan gunung berapi adalah promosi studi mitigasi dan pengelolaan bencana kebumiharian dalam struktur kurikulum fisika universitas.

Dalam konteks tersebut di atas, penelitian ini mempelajari relevansi antara frekuensi gempa vulkanik sebagai salah satu indikator bahaya letusan dan peluang letusan dengan memanfaatkan program *Eruption* (Barclay *et al.*, 2011) yang mensimulasikan bencana letusan gunung berapi. Program *Eruption* memiliki tiga buah instrumen monitoring aktivitas magmatik, yaitu *seismometer* untuk mengukur frekuensi gempa vulkanik, *cospec* untuk mengukur emisi gas SO_2 , dan *geodimeter* untuk mengukur deformasi tanah. Monitoring aktivitas magmatik dilakukan sebagai basis untuk menetapkan status bencana yang diperlukan sebagai bagian dari mekanisme pengambilan keputusan darurat tanggap bencana.

Sebanyak 17 responden mahasiswa strata satu dilibatkan dalam penelitian simulasi monitoring bencana letusan dengan beberapa temuan utama penelitian adalah sebagai berikut:

1. Semakin tinggi level indikator letusan, maka semakin besar peluang letusan;
2. Frekuensi gempa vulkanik merupakan indikator utama bahaya letusan;
3. Dengan fokus monitoring frekuensi gempa vulkanik, simulasi bencana letusan untuk pengambilan keputusan darurat-strategis yang cepat, tepat, dan akurat memberikan hasil bahwa 55% populasi total penduduk dapat diselamatkan dan membutuhkan 32% biaya terpakai dari dana total yang tersedia.

Saran

Sehubungan dengan instrumen utama penelitian (program *Eruption*) yang berbasis *web* dan bersifat *on-line running*, beberapa kesulitan teknis ditemui saat pelaksanaan penelitian, yaitu akses internet yang lambat dan tidak stabil di Unesa. Namun demikian, kesulitan teknis ini tidak mengganggu pelaksanaan penelitian secara fundamental. Kesulitan teknis yang lain dan cukup mengganggu adalah ketersediaan data lapangan tentang aktivitas gunung berapi aktif di Indonesia. PVMBG sebagai badan resmi pemerintah yang relevan dengan urusan ini juga tidak memberikan rincian data yang komprehensif sebagai bahan pembandingan. Saran konstruktif dengan mempertimbangkan keterbatasan dan keberagaman responden penelitian adalah sebagai berikut:

1. Untuk penelitian lanjutan sejenis dengan melibatkan mahasiswa strata satu, jumlah responden harus lebih banyak lagi untuk melihat konsistensi hasil-hasil percobaan simulasi bencana letusan;
2. Untuk penelitian lanjutan sejenis dengan melibatkan mahasiswa strata dua, sebaiknya dikaji terlebih dahulu apakah level pengetahuan kognitif mahasiswa bisa mempengaruhi hasil-hasil percobaan simulasi bencana letusan.

DAFTAR PUSTAKA

- 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, pp.85-92.
- Bladh, K. L. 1990. Teaching hazard-mitigation education in a liberal-art college. *Journal of Geoscience Education*, Vol.38, pp.339-342.
- Harpp, K. S. and Sweeney, W. J. 2002. Simulating a volcanic crisis in the classroom. *Journal of Geoscience Education*, Vol.50, pp.410-418.
- Herlambang, M. A. 2014. *Studi Simulasi Deformasi Tanah Sebagai Indikator Bencana Letusan Gunung Api Untuk Pengambilan Keputusan Darurat*. Skripsi. Jurusan Fisika, FMIPA Universitas Negeri Surabaya. tidak dipublikasikan.
- Hodder, A. P. W. 1999. Using a decision-assesment matrix in volcanic-hazard management. *Journal of Geoscience Education*, Vol.47, pp.350-356.
- Kirkland, K. 2010. *Earth Sciences: notable research and discoveries*. Infobase Publishing. New York, US, pp.1-212.
- Mayer, R. E. and Moreno, R. 2002. Aids to computer-based multimedia learning. *Learning and Instruction*, Vol.12, pp.107-119.

- Renshaw, C. E. Taylor, H. A. And Reynolds, C. H. 1998. Impact of computer-assisted instruction in hydrogeology on critical thinking skills. *Journal of Geoscience Education*, Vol.46, pp.274-279.
- 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.
- Smith, D. L., Hoersch, A. L. and Gordon, P. R. 1995. Problem-based learning in the undergraduate geology classroom. *Journal of Geoscience Education*, Vol.43, pp.385-390.
- Taylor, H. A., Renshaw, C. E. and Jensen, M. D. 1997. Effects of computer-based role playing on decision making skills. *Journal of Educational Computing Research*, Vol.17, pp.147-164.