

## SIMULASI MONITORING EMISI GAS SO<sub>2</sub> SEBAGAI INDIKATOR BAHAYA LETUSAN GUNUNG API UNTUK MELATIHKAN TINDAKAN EVAKUASI

Aprilian Eka Safitri

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya  
[aprilian\\_eka@yahoo.com](mailto:aprilian_eka@yahoo.com)

### Abstrak

Posisi geografis Indonesia membawa konsekuensi geologis sebagai negara yang memiliki deretan gunung berapi aktif, oleh karena itu potensial mengalami bencana letusan gunung berapi. Meskipun telah banyak upaya dilakukan oleh pemerintah dan lembaga non-pemerintah dalam mengatasi dampak dan resiko bencana letusan, namun hampir semua upaya belum membuahkan hasil optimal. Studi mitigasi dan pengelolaan bencana bertumpu pada upaya pencegahan dini, oleh karena itu perlu diintegrasikan dalam kurikulum sains dan fisika universitas. Penelitian ini mempelajari relevansi antara emisi gas SO<sub>2</sub> sebagai salah satu indikator bahaya letusan dan peluang letusan dengan memanfaatkan aplikasi *Eruption* yang mensimulasikan bencana letusan gunung berapi dan melibatkan 16 responden mahasiswa strata satu. Fokus penelitian adalah simulasi monitoring emisi gas SO<sub>2</sub> sebagai basis pengambilan keputusan darurat bencana berupa tindakan evakuasi yang cepat dan tepat berdasarkan informasi yang diberikan oleh instrumen monitoring aktivitas vulkanik, yaitu *cospec* mengukur emisi gas SO<sub>2</sub>, *seismometer* mengukur frekuensi gempa vulkanik, dan *geodimeter* mengukur deformasi tanah. Tujuan penelitian ini adalah melatih kemampuan mengambil keputusan darurat kepada mahasiswa strata satu sebagai bagian dari sivitas akademik yang kelak akan menjadi anggota masyarakat. Temuan utama penelitian adalah sebagai berikut: (1) Proses geofisika dan geokimia adalah proses yang mengontrol aktivitas magmatik dan letusan gunung berapi; (2) peningkatan emisi gas SO<sub>2</sub> per hari diikuti dengan membesarnya peluang bencana letusan; dan (3) keputusan tindakan evakuasi oleh semua responden penelitian menghasilkan rata-rata 47% dari total penduduk dapat diselamatkan dengan biaya operasional mencapai 27% dari total dana tersedia.

**Kata Kunci:** mitigasi bencana, emisi gas SO<sub>2</sub>, *Eruption*.

### Abstract

Indonesia is a country located in the circumference of Pacific ring of fire and has so many active volcanoes, and thus potential to disaster due to volcanic eruption. Efforts for minimising impacts and reducing risks have been implemented by both the government and non-governmental body, but much has not yet been achieved. Attention must first be put on both education and public awareness as these are the cornerstone of fundamental approaches aimed at reducing vulnerabilities to geophysical hazards. Concern with program for disaster risk reduction gives room for Indonesian tertiary institutions to introduce knowledge and skill required for university students by integrating disaster preparedness into university science curricula. This research therefore examines the relevance between SO<sub>2</sub> emission as one of volcanic eruption indicators and the probability for the eruption to occur. A small group of 16 undergraduate science students are involved and examine volcanic eruption simulation using an on-line software called *Eruption*. The study focuses upon monitoring of SO<sub>2</sub> emission by running the program for disaster simulation as a basic mechanism of emergency decision making skill to evacuate people living near the volcano. The decision is based on information measured by three monitoring instruments for volcanic activities: *cospec* for SO<sub>2</sub> emission, *seismometer* for earthquake frequency, and *geodimeter* for ground deformation. The aims of this study is thus to develop emergency decision making skills to university physics and science students as these are part of education processes. The primary research findings are as follows: (1) geophysical and geochemical processes control volcanic activity and eruption; (2) the probability for volcanic eruption is line with an increase in the level of SO<sub>2</sub> emission; and (3) lives saved is 47% of total population with a total of 27% operational cost spent.

**Keywords:** mitigation of disaster, SO<sub>2</sub> emission, *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. Kesadaran dan kesiagaan masyarakat adalah faktor penentu seberapa besar dampak dan resiko yang diakibatkan oleh bencana gempa bumi dan letusan gunung berapi di berbagai wilayah tanah air, khususnya wilayah-wilayah rawan bencana. Suatu pendekatan multi disiplin melalui berbagai aspek perlu dilakukan untuk mengurangi dampak dan resiko bencana menjadi sekecil

mungkin, misalnya melalui aspek pendidikan di berbagai jenjang pendidikan formal termasuk jenjang pendidikan tinggi di universitas dalam berbagai disiplin ilmu terkait dengan sains bencana kebumihannya. Dalam konteks ini, pengembangan pembelajaran fisika dan sains kebumihannya level universitas yang mengkombinasikan kajian ilmu dasar dan terapan yang relevan dengan sains bencana kebumihannya adalah upaya alternatif untuk berpartisipasi dalam program pengurangan dampak dan resiko bencana di tanah air. Sejalan dengan hal tersebut di atas, Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DitLitabmas), Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud) melalui kewenangannya memberikan pedoman 12 tema penelitian strategis nasional untuk memberikan ruang bagi semua disiplin ilmu terkait yang mungkin diterapkan dalam upaya penyelesaian isu-isu strategis yang mendesak berdasarkan skala prioritas. Salah satu tema penelitian yang didorong untuk dilaksanakan melalui pendekatan multi disiplin adalah pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana, yang kemudian diadopsi dalam program yang tertuang dalam Rencana Induk Penelitian (RIP) Unesa Tahun Anggaran (TA) 2013/2014. Tema penelitian tersebut sangat relevan dilaksanakan di negara kita mengingat posisi geografis Indonesia yang terletak di antara pertemuan tiga lempeng besar tektonik, yaitu: Lempeng Euro-Asia, Lempeng Australia, dan Lempeng India sehingga berpotensi besar mengakibatkan bencana kebumihannya, seperti gempa bumi tektonik, letusan gunung berapi, tanah longsor, banjir, dan tsunami (Aiydan, 2008; Brune *et al.*, 2010; Baeda, 2011; Madlazim, 2011).

Penelitian bertema studi pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana kebumihannya sangat diperlukan mengingat fakta menunjukkan lemahnya struktur kurikulum nasional fisika dan sains IPA untuk semua jenjang pendidikan. Untuk jenjang pendidikan tinggi, penelitian bertema sejenis dapat digunakan sebagai wahana pengembangan karakter dan wawasan keilmuan bagi mahasiswa FMIPA, khususnya mahasiswa Jurusan Fisika agar memiliki *life skill* yang diperlukan untuk bertahan ketika kelak saat hidup bermasyarakat dengan memanfaatkan bekal karakter dan pengetahuan yang dimiliki. Penelitian dapat dilakukan melalui pengembangan pembelajaran fisika dan sains kebumihannya level universitas berbasis *web* dan komputer untuk mensimulasikan fenomena alam yang relevan dengan bencana letusan gunung berapi. Dengan menerapkan pembelajaran berbasis *web* dan komputer, fisika dan sains kebumihannya dipelajari dengan lebih interaktif tanpa mengurangi esensi dari hukum fisika dan prinsip dasar sains kebumihannya terkait bencana letusan gunung berapi.

Dalam konteks tersebut di atas, *Eruption* merupakan perangkat lunak yang awalnya dirancang oleh ilmuwan di

the State University of New York at Buffalo (Sheridan *et al.*, 1993) yang diperbaharui dan dapat diakses *on line* di <http://www.darmouth.edu/~earthsci/> (Barclay *et al.*, 2011) sebagai sarana belajar mitigasi dan pengelolaan bencana yang mensimulasikan bencana letusan gunung berapi. Perangkat lunak ini dapat memberikan informasi yang akurat mengenai emisi gas vulkanik SO<sub>2</sub> di atmosfer lokal, deformasi tanah, dan frekuensi gempa vulkanik yang merupakan tiga indikator bencana letusan gunung berapi. Informasi dari ketiga indikator tersebut diperoleh dari tiga instrumen yang biasa digunakan untuk memantau aktivitas gunung berapi, yaitu: *cospec*, *geodimeter*, dan *seismometer* (Harpp and Sweeney, 2002; Barclay *et al.*, 2011). Penelitian ini fokus pada monitoring emisi gas SO<sub>2</sub> sehingga pengamatan ditujukan pada simulasi bacaan *cospec* dan hukum termodinamika sebagai prinsip dasar fisika terkait dengan aktivitas gunung berapi.

Termodinamika adalah cabang ilmu fisika yang membahas aliran panas antara sistem dan lingkungan, sehingga bisa terjadi perubahan struktur internal, struktur fisik atau perubahan wujud zat dari sistem fisis yang sedang dipelajari. Panas adalah salah satu bentuk energi yang dapat mengalir pada satu benda yang memiliki distribusi temperatur yang tidak homogen atau dari benda yang satu ke benda lain yang berbeda temperatur. Total energi yang dikandung oleh suatu benda biasa disebut dengan energi internal. Proses termodinamik melibatkan perpindahan panas dan kerja yang dilakukan oleh (atau diberikan pada) sistem sehingga mengubah energi internal sistem tersebut. Hal ini bisa dituliskan secara matematis dalam bentuk perubahan infinitesimal sebagai berikut:

$$dQ = dU + dW \quad (2.1)$$

dengan  $dQ$  adalah diferensial non-eksak yang menyatakan aliran panas dari (atau menuju ke) sistem fisis,  $dU$  adalah diferensial eksak yang menyatakan energi internal sistem fisis, dan  $dW$  adalah diferensial non-eksak yang menyatakan kerja yang dilakukan oleh (atau diberikan pada) sistem fisis tersebut. Untuk mengetahui kuantitas terukur dalam suatu proses termodinamis, maka proses integrasi persamaan (2.1) menghasilkan perubahan terukur berikut:

$$Q = \Delta U + W \quad (2.2)$$

dengan  $Q$  menyatakan total aliran panas dari (atau menuju ke sistem fisis),  $\Delta U$  menyatakan total energi internal sistem fisis, dan  $W$  menyatakan total kerja yang dilakukan oleh (atau diberikan pada) sistem fisis tersebut. Persamaan (2.2) menggambarkan kekekalan energi yang merupakan prinsip dasar fisika dan dikenal sebagai hukum pertama termodinamika.

Arti fisis persamaan (2.2) adalah sebagai berikut: bila  $Q$  berharga positif berarti sistem menerima panas; bila  $\Delta U$  berharga positif berarti sistem mengalami kenaikan

temperatur; bila  $W$  berharga positif berarti sistem melakukan kerja. Terapan persamaan (2.2) pada kasus sistem gas dalam ruang tertutup dengan volume awal  $V_i$  (misalnya gas vulkanik yang terperangkap dalam dapur magma) menunjukkan beberapa poin penting. Bila sejumlah panas diberikan pada sistem gas tersebut ( $Q > 0$ ) pada tekanan tetap, maka sebagian panas digunakan untuk meningkatkan temperatur sistem dari  $T_i$  menjadi  $T_f$  (di mana  $\Delta T = T_f - T_i > 0$ ), sehingga energi internal meningkat dari  $U_i$  menjadi  $U_f$  (di mana  $\Delta U = U_f - U_i > 0$ ) dan sebagian lain digunakan oleh sistem untuk melakukan kerja ( $W > 0$ ). Berdasarkan kasus gas dalam ruang tertutup, maka untuk proses ekspansi isobaris rumusan  $W$  pada persamaan (2.2) didefinisikan sebagai  $W = P \Delta V = P (V_f - V_i)$ , di mana  $V_f > V_i$ . Dengan demikian, persamaan (2.2) dituliskan menjadi

$$Q = \Delta U + P \Delta V \quad (2.3)$$

dengan  $P$  menyatakan tekanan tetap dan  $\Delta V$  menyatakan perubahan volume yang terjadi selama proses. Persamaan (2.3) berlaku untuk semua proses termodinamik, baik dalam skala laboratorium (misalnya gas dalam wadah tertutup) maupun kasus nyata di lapangan (misalnya gas solfatara dalam dapur magma).

Selain hukum pertama yang membahas kekekalan energi terkait dengan aliran panas pada sistem tertutup, dikenal juga hukum kedua termodinamika yang menceritakan tentang besaran fisika entropi, yaitu ukuran ketidakteraturan sistem. Dengan definisi seperti itu, maka sistem yang memiliki entropi lebih besar berarti sistem tersebut lebih tidak teratur. Untuk sistem tertutup dan proses alami yang bersifat spontan dan *irreversible*, entropi sistem selalu akan meningkat seiring dengan perubahan waktu. Dengan demikian, secara alamiah semua sistem fisis tertutup akan cenderung menuju ke arah ketidakteraturan (*disordered system*). Secara matematis, hal ini bisa dituliskan sebagai

$$\Delta S > 0 \quad (2.4)$$

dengan  $\Delta S$  menyatakan perubahan entropi sistem tertutup secara spontan dan *irreversible*. Dalam banyak literatur, persamaan (2.4) sering dituliskan secara teoretik sebagai  $\Delta S \geq 0$  dengan  $\Delta S = 0$  berarti sistem tertutup tidak mengalami perubahan entropi. Kasus seperti ini bisa terjadi bila tidak ada pertukaran kalor antara sistem dan lingkungan yang biasa disebut dengan proses adiabatik. Bila kondisi kritis dipenuhi, maka *chaotic situation* dapat berlangsung tanpa bisa ditolak atau dihalangi. Pelepasan energi internal merupakan mekanisme fisis untuk mengubah keadaan sistem dari tidak teratur menjadi teratur kembali dan merupakan sesuatu yang bersifat alami pula.

Terapan prinsip entropi pada kasus aktivitas vulkanik dan letusan gunung berapi adalah sebagai berikut. Misalkan dapur magma dipandang sebagai sistem fisis

tertutup yang pada fase awal hanya terdiri dari batuan padat berbagai jenis dan ukuran. Oleh karena berbagai peristiwa fisis yang berlangsung pada tekanan dan temperatur sangat tinggi, sebagian batuan padat tersebut meleleh menjadi fase cair dan gas. Peristiwa dalam magma tersebut berlangsung alami dan spontan tanpa ada pemicu dari luar. Perubahan fase zat dari padat dengan keteraturan tinggi gerak atom menjadi cair dengan keteraturan gerak atom yang rendah dan kemudian menjadi gas dengan karakteristik gerak random molekul atau atom yang menunjukkan ketidakteraturan yang tinggi jelas membuktikan eksistensi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa entropi sistem tertutup selalu akan meningkat. Hal ini dapat dituliskan secara matematis sebagai berikut,

$$Q = T \Delta S \quad (2.5)$$

dengan  $T$  adalah temperatur saat berlangsung perubahan entropi sistem  $\Delta S$ .

Adalah jelas berdasarkan persamaan (2.5) di atas, bila sejumlah panas diberikan pada dapur magma ( $Q > 0$ ) dengan  $T$  selalu berharga positif maka perubahan entropi magma  $\Delta S$  akan berharga positif. Hal ini berarti entropi sistem akan meningkat, dengan kata lain batuan padat yang ada dalam dapur magma sebagian akan meleleh menjadi cairan kental dan kemudian berubah menjadi gas. Proses termodinamik pada tekanan dan temperatur yang tinggi tersebut terus akan berlangsung sampai keadaan kritis tercapai, di mana tekanan hidrostatis dari fluida magma mampu mengatasi gaya berat gravitasi struktur fisik batuan di lapisan atas dan memberikan *net force* ke atas menjebol kepundan yang berujung pada fenomena letusan gunung berapi.

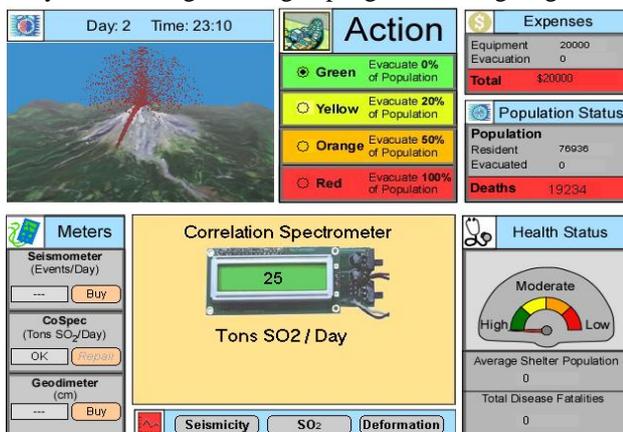
Mempertimbangkan dampak dan resiko pelepasan gas vulkanik  $SO_2$  saat terjadi letusan gunung berapi, maka penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hukum-hukum dasar fisika yang mendasari mekanisme pelepasan gas beracun gunung berapi dari dapur magma dan level kritis gas  $SO_2$  yang dapat menjadi indikator bahaya bencana letusan gunung berapi. Pengetahuan tentang kondisi kritis gas  $SO_2$  di atmosfer lokal sangat dibutuhkan untuk pengambilan keputusan yang cepat dan tepat dalam menghadapi situasi darurat bencana. Simulasi bencana letusan gunung berapi dengan memanfaatkan piranti lunak *Eruption* dipelajari sebagai bagian dari pemecahan masalah berbasis informasi terukur yang akurat dan obyektif dari instrumen monitoring aktivitas gunung berapi.

Proses pengambilan keputusan darurat baik keputusan sehari-hari maupun keputusan penting tidak bisa dilepaskan dari kemampuan berpikir kritis dan logis. Kemampuan mengambil keputusan sangat dipengaruhi oleh kemandirian berpikir dan keberanian bertindak yang dibutuhkan dalam pemecahan suatu masalah. Dalam

konteks pendidikan mitigasi dan pengelolaan bencana, masalah nyata yang dihadapi adalah potensi bahaya bencana letusan gunung berapi berikut semua dampak dan resiko letusan. Untuk mengatasi masalah nyata tersebut, kemampuan mengambil keputusan darurat bencana yang cepat dan tepat berupa tindakan evakuasi penduduk perlu untuk dilatihkan kepada mahasiswa sains dan fisika. Menurut *Independent Study* by FEMA (2005), salah satu cara yang efektif untuk menghadapi situasi darurat adalah dengan melakukan lima langkah sebagai berikut: (1) mengidentifikasi masalah; (2) menimbang beberapa solusi alternatif; (3) memilih salah satu solusi; (4) menerapkan solusi pilihan; dan (5) mengevaluasi penerapan solusi. Dalam penelitian ini, lima langkah tersebut menyatu dengan tahap-tahap teknis pengambilan dan pengolahan data penelitian. Oleh karena itu, perancangan tindakan evakuasi penduduk yang baik sangat membutuhkan level kemampuan berpikir logis dan rasional dalam menghadapi situasi kritis.

## METODE

Penelitian ini merupakan penelitian verifikasi yang membuktikan adanya korelasi positif antara peningkatan level emisi gas SO<sub>2</sub> per hari dan peluang terjadinya letusan dengan bantuan simulasi bencana letusan gunung berapi menggunakan perangkat lunak *Eruption* yang dapat diakses *on line* secara gratis di <http://www.dartmouth.edu/~earthsci/eruption> (Barclay *et al.*, 2011). *Eruption* dirancang sedemikian rupa berdasarkan aktivitas nyata gunung berapi, sehingga memudahkan peneliti ketika digunakan untuk mempelajari aktivitas magmatik secara efektif dan efisien, tanpa membutuhkan biaya dan waktu yang lebih banyak dibandingkan dengan pengamatan langsung.



**Gambar 1.** Tampilan antar muka tiga indikator letusan dalam *Eruption*.

*Eruption* mensimulasikan aktivitas magmatik yang dilengkapi dengan tiga instrumen terpadu untuk memantau aktivitas gunung berapi, yaitu: *cospec*, *geodimeter*, dan *seismometer*. *Cospec* memberikan informasi tentang emisi SO<sub>2</sub>, *geodimeter* memberikan

informasi tentang deformasi lapisan tanah, sedangkan *seismometer* memberikan informasi tentang frekuensi gempa vulkanik. Informasi ketiga instrumen memberikan gambaran keadaan sebelum, saat, dan pasca letusan, sehingga simulasi hasil ukur ketiga instrumen dapat menjadi parameter dinamik kapan gunung berapi akan meletus kembali, seberapa besar dampak dan resiko yang akan ditimbulkan, dan berapa banyak penduduk yang harus dievakuasi.

Penelitian ini bersifat *theoretical work* yang mensimulasikan fenomena alam letusan gunung berapi dengan bantuan perangkat lunak *Eruption*. Kegiatan penelitian diawali dengan memberikan pengetahuan awal kepada mahasiswa Program Studi Pendidikan Sains FMIPA sebagai responden penelitian tentang letusan gunung berapi. Penjelasan difokuskan pada prinsip dasar fisika yang relevan dengan mekanisme emisi gas SO<sub>2</sub> dari lubang kepundan dan distribusi gas SO<sub>2</sub> di atmosfer lokal untuk melatih keterampilan berpikir kritis dan logis sebagai bagian dari kemampuan mengambil keputusan yang cepat, tepat, dan akurat dalam menghadapi situasi darurat saat bencana terjadi. Dalam hal ini, pengambilan keputusan adalah berupa tindakan evakuasi oleh responden, yang dalam menjalankan simulasi berperan sebagai ahli vulkanologi, kepada penduduk yang tinggal di wilayah terdampak letusan gunung berapi.

Keputusan yang diambil dalam menentukan jumlah penduduk yang harus dievakuasi juga harus memperhitungkan keselamatan penduduk ketika berada dalam pengungsian dan biaya operasional yang diperlukan untuk memenuhi segala macam kebutuhan hidup, mengingat para pengungsi rentan mengalami penyakit baik lahiriah maupun batiniah jika fasilitas, sarana dan prasarana, serta kondisi lingkungan pengungsian tidak layak dan memadai. Oleh sebab itu, tindakan evakuasi penduduk yang akan dilakukan juga mempertimbangkan keseimbangan antara jumlah penduduk yang dievakuasi berdasarkan skala prioritas dan biaya yang dibutuhkan, serta ketersediaan fasilitas.

Penelitian dilakukan dengan mengamati aktivitas gunung berapi dalam simulasi bencana letusan, memahami penunjukan nilai hasil pembacaan instrumen dan melakukan tindakan evakuasi bila tindakan evakuasi perlu untuk dilakukan. Pemahaman responden terhadap nilai hasil pembacaan instrumen berpengaruh besar terhadap keberhasilan responden dalam mengambil keputusan strategis dan tindakan evakuasi penduduk yang efektif dan efisien.

Data penelitian ini adalah respons alat berupa hasil pembacaan indikator bahaya letusan oleh tiga instrumen monitoring dalam *Eruption* dan respons responden berupa pengambilan keputusan darurat tindakan

evakuasi. Dalam hal ini, penelitian fokus kepada pembacaan indikator bahaya letusan oleh salah satu instrumen, yaitu *cospec*. Sebelum melakukan pengambilan data dan menafsirkan resiko yang akan ditimbulkan oleh gunung berapi, responden perlu mengetahui bagaimana memahami dan menafsirkan hasil pembacaan aktivitas gunung berapi oleh instrumen monitoring.

*Cospec* memberikan informasi tentang konsentrasi emisi gas SO<sub>2</sub> di atmosfer lokal, sehingga untuk mengetahui aman atau tidaknya wilayah sekitar gunung berapi diperlukan pemahaman dan penafsiran hasil pembacaan *cospec*. Salah satu cara untuk memahami dan menafsirkan hasil pembacaan *cospec* adalah dengan melihat sejarah pembacaan *cospec* untuk jenis gunung berapi yang sama. Jika penunjukan nilai tertentu dari hasil pembacaan *cospec* mengindikasikan keadaan aman, maka dalam kondisi serupa diperkirakan aman, dengan kata lain kemungkinan terjadi letusan gunung berapi adalah kecil. Oleh karena itu, rangkuman data aktivitas gunung berapi yang ditunjukkan melalui hasil pembacaan *cospec* (juga *geodimeter* dan *seismometer*) harus diperoleh terlebih dahulu untuk mengetahui dan menentukan keterkaitan antara hasil ukur instrumen monitoring aktivitas gunung berapi dan kemungkinan terjadinya suatu letusan. Dalam hal *Eruption*, sejarah letusan gunung berapi tertentu (namun tidak disebutkan data tentang nama dan lokasi serta jenis gunung berapi yang dijadikan sebagai basis data) ditampilkan pada bagian *history*.

Berdasarkan sejarah pembacaan aktivitas gunung berapi tiap 12 jam oleh *cospec* dalam satu masa periode aktivitas selama 25 hari yang telah terangkum dalam 50 data untuk satu jenis gunung berapi tertentu dalam *Eruption* kemudian dibuat tabel peluang letusan. Masing-masing level emisi gas SO<sub>2</sub> memberikan pilihan tindakan evakuasi ('*action*') pada antar muka program *Eruption* yang sesuai, yaitu: *yellow*, *orange*, dan *red* yang diasosiasikan dengan evakuasi penduduk sebanyak 20% dan 50% (evakuasi parsial), dan 100% (evakuasi total). Keputusan mengevakuasi total penduduk bila bacaan *cospec* menunjukkan emisi gas SO<sub>2</sub> telah mencapai > 750 ton/hari adalah logis dan bijak, meskipun peluang letusan belum mencapai 90%, suatu taraf peluang yang dapat dianggap hampir pasti terjadi. Logika berpikir yang sama diterapkan untuk emisi gas SO<sub>2</sub> < 400 ton/hari dan antara 401-750 ton/hari.

Pada akhir sesi percobaan simulasi bencana, program *Eruption* akan memberikan grafik dengan tampilan sumbu X menyatakan jumlah penduduk yang masih hidup dan sumbu Y menyatakan jumlah dana yang dihabiskan untuk proses evakuasi dan pembelian instrumen monitoring. Grafik tersebut memiliki rekaman

data keputusan sebelumnya dengan lingkaran merah yang menggambarkan tingkat keterampilan responden penelitian dalam mengambil keputusan yang cepat, tepat, dan akurat berkaitan dengan jumlah penduduk yang harus segera dievakuasi untuk mereduksi jumlah korban jiwa yang mungkin terjadi saat bencana letusan.

Tingkat keterampilan responden dalam mengambil keputusan yang cepat, tepat, dan akurat terhadap situasi darurat bencana diklasifikasikan menjadi empat kategori, yaitu: *inept* (tidak layak), *reckness* (ceroboh), *risk adverse* (rugi) dan *expert* (ahli) yang direpresentasikan melalui posisi lingkaran merah pada grafik. Simulasi bencana letusan gunung berapi yang dilakukan oleh responden berbeda bisa menghasilkan posisi lingkaran merah yang berbeda pada grafik keputusan tindakan evakuasi. Hal tersebut mencerminkan perbedaan tingkat kemampuan responden dalam mengambil keputusan darurat tanggap bencana.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Saat pengambilan data, 16 orang mahasiswa Prodi Pendidikan Sains 2011 sebagai responden penelitian menjalankan program *Eruption*. Setelah *running* dan pencatatan data, maka diperoleh tabel bacaan hasil ukur indikator letusan oleh instrumen monitoring yang kemudian dari tabel tersebut dapat diperoleh tabel korelasi bacaan indikator letusan oleh semua instrumen dan oleh *cospec* saja terhadap peluang terjadinya letusan seperti yang disajikan berikut.

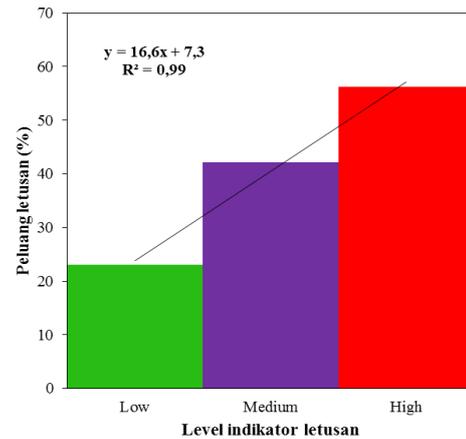
**Tabel 1.** Korelasi bacaan semua instrumen dan peluang letusan dari 16 responden.

Responden	Peluang letusan berdasarkan bacaan semua instrumen monitoring (%)		
	Low Level	Mid Level	High Level
A	25,0	55,0	68,8
B	25,0	55,0	68,8
C	23,1	42,1	56,3
D	23,1	42,1	56,3
E	23,1	31,6	56,3
F	23,1	42,1	43,8
G	23,1	47,4	43,8
H	23,1	31,6	43,8
I	15,4	36,8	56,3
J	23,1	42,1	50,0
K	15,4	15,8	6,3
L	15,4	42,1	56,3
M	15,4	36,8	56,3
N	7,7	42,1	43,8

Responden	Peluang letusan berdasarkan bacaan semua instrumen monitoring (%)		
	Low Level	Mid Level	High Level
O	15,4	36,8	62,5
P	30,8	42,1	56,3

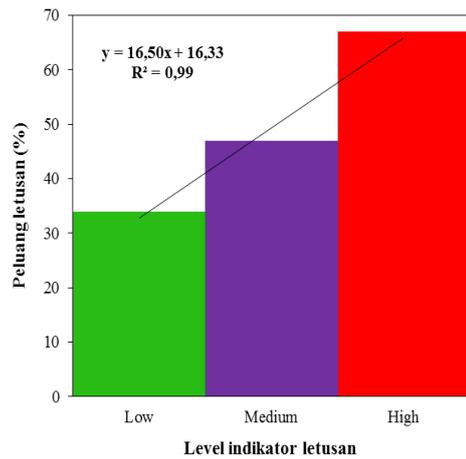
**Tabel 2.** Korelasi bacaan *cospec* dan peluang letusan dari 16 responden.

Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Tabel 2, kemudian dibuat diagram batang yang menggambarkan hubungan kualitatif antara level instrumen letusan dan peluang letusan seperti terlihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pada kedua gambar tersebut level instrumen letusan direpresentasikan dengan 'Low Level' untuk emisi SO<sub>2</sub>



**Gambar 2.** Hubungan level instrumen letusan dan peluang letusan hasil bacaan semua instrumen monitoring dari 16 responden.

Responden	Peluang letusan berdasarkan bacaan Cospec (%)		
	0-400 ton/hari	401-750 ton/hari	> 750 ton/hari
A	42,3	63,2	66,7
B	42,3	63,2	66,7
C	34,6	47,4	66,7
D	34,6	47,4	66,7
E	30,8	42,1	66,7
F	34,6	42,1	66,7
G	34,6	47,4	66,7
H	23,1	42,1	66,7
I	38,5	42,1	66,7
J	34,6	47,4	66,7
K	15,4	5,3	0
L	30,8	47,4	66,7
M	30,8	47,4	66,7
N	23,1	47,4	66,7
O	30,8	47,4	66,7
P	30,8	47,4	66,7



**Gambar 3.** Hubungan level indikator letusan dan peluang letusan hasil bacaan *cospec* dari 16 responden.

Selain hasil bacaan indikator letusan dari 3 instrumen monitoring terpadu, hasil dari simulasi *Eruption* juga berupa grafik keputusan darurat tindakan evakuasi penduduk. Berdasarkan grafik yang dihasilkan oleh 16 responden tersebut, maka dibuat tabel korelasi antara persentase populasi 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 16 responden.

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

dalam rentang 0-400 ton/hari; 'Mid Level' untuk emisi SO<sub>2</sub> dalam rentang 401-750 ton/hari; dan 'High Level' untuk emisi SO<sub>2</sub> > 750 ton/hari. Ada perbedaan kecil kemiringan garis lurus yang menghubungkan titik tengah pada masing-masing batang berwarna hijau, ungu, dan merah pada Gambar 2 dan Gambar 3, namun secara prinsip kedua diagram batang menggambarkan hal yang sama, yaitu peningkatan gas vulkanik SO<sub>2</sub> yang dilepaskan per hari dari kawah gunung berapi menyebabkan membesarnya peluang letusan. Hal ini adalah wajar karena emisi gas SO<sub>2</sub> adalah salah satu instrumen monitoring letusan.

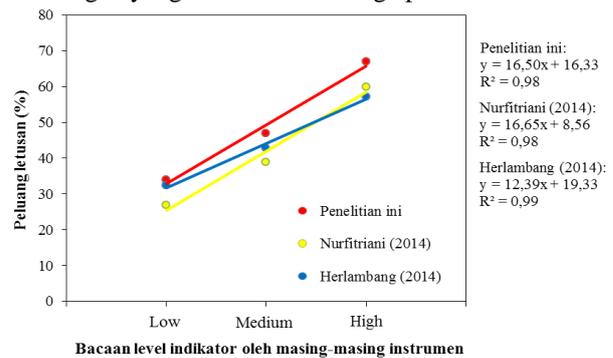
Responden	Jiwa terselamatkan (%)	Dana total terpakai (%)
I	41,0	23,2
J	55,0	25,0
K	42,0	35,7
L	48,0	51,8
M	78,0	21,4
N	37,0	23,2
O	38,0	27,1
P	58,0	28,6
<b>Rerata</b>	<b>46,6</b>	<b>27,3</b>

Tabel 3 di atas menceritakan bahwa 16 responden yang terlibat dalam pengambilan keputusan darurat tanggap bencana mampu menyelamatkan 47% populasi dengan biaya operasional mencapai 27% dari dana total yang tersedia, hal ini membuktikan bahwa penelitian ini relevan jika dibandingkan dengan penelitian Barclay *et al.* (2011) yang mayoritas respondennya berhasil menyelamatkan 20-55% penduduk dengan biaya operasional bervariasi antara 15-45% dari dana total yang tersedia.

Fokus diskusi hasil-hasil penelitian adalah menjawab hipotesa penelitian yang mengatakan bahwa ada korelasi positif antara peningkatan level indikator letusan (emisi gas  $SO_2$ ) dan peluang terjadinya letusan. Dalam konteks penelitian sejenis yang memanfaatkan program *Eruption*, Nurfitriani (2014) mempelajari frekuensi gempa vulkanik dan Herlambang (2014) mempelajari deformasi tanah sebagai indikator bencana letusan gunung berapi. Dengan metodologi yang sama, gambar yang sama dengan Gambar 2 juga ditemukan oleh Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014). Hal ini berarti bahwa level indikator dan peluang letusan adalah berkorelasi positif. Dengan kata lain, semua instrumen monitoring aktivitas magmatik memberikan kontribusi pada hasil-hasil ukur indikator bahaya letusan dan tidak ada cara untuk mengisolasi salah satu indikator dari indikator lainnya. Oleh karena itu, perilaku aktivitas magmatik gunung berapi tidak bisa dilihat hanya dari frekuensi gempa vulkanik saja. Seringkali kombinasi hasil-hasil ukur beberapa indikator letusan digunakan untuk penetapan status bencana.

Berbeda dengan Gambar 2, diagram batang pada Gambar 3 yang dibuat dengan hanya memperhatikan bacaan level indikator letusan oleh *cospec* saja memiliki kemiringan garis yang berbeda dengan temuan Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014). Meski perbedaan kemiringan tersebut kecil, khususnya antara temuan peneliti dan Nurfitriani (2014) namun cukup signifikan untuk diinterpretasikan. Berikut ini adalah plot

dalam satu gambar (Gambar 4) dari 3 garis lurus dengan kemiringan yang berbeda oleh ketiga penelitian.



Gambar 4. *The relative importance* dari masing-masing indikator letusan.

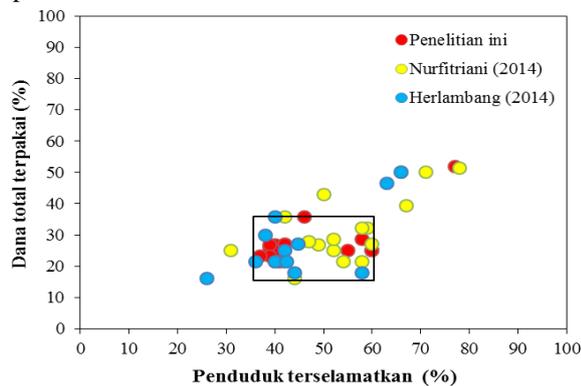
Gambar 4. menceritakan bahwa frekuensi gempa vulkanik yang diukur oleh *seismometer* dan merupakan fokus penelitian Nurfitriani (2014) merupakan indikator utama bahaya letusan dan bersifat dominan relatif terhadap dua indikator lain (emisi gas  $SO_2$  diukur oleh *cospec* dan deformasi tanah diukur oleh *geodimeter*).

Terlepas dari kemiringan garis yang berbeda pada Gambar 4. yang paling penting dari diskusi bagian ini adalah bahwa baik indikator bahaya letusan diukur oleh semua instrumen monitoring maupun oleh salah satu instrumen monitoring (bisa *cospec*, *seismometer*, atau *geodimeter*) memberikan tafsiran fisis yang sama, yaitu peningkatan level indikator letusan dari keadaan 'Low Level' ke 'Mid Level' menuju ke 'High Level' berkontribusi langsung pada peluang bencana letusan. Semakin tinggi level indikator letusan, semakin besar peluang terjadinya letusan. Dengan demikian, hipotesa penelitian ini terjawab yaitu ada korelasi positif antara indikator bahaya letusan dan peluang letusan. Hal ini sangat penting dalam mekanisme pengambilan keputusan strategis yang cepat, tepat, dan akurat yang bersifat darurat bencana untuk mengevakuasi penduduk di wilayah gunung berapi yang didahului oleh penetapan status bencana melalui pengamatan langsung indikator letusan oleh instrumen monitoring.

Agar perbandingan antara temuan penelitian ini dan temuan kedua peneliti tersebut di atas menjadi jelas, maka sekali lagi dibuat *overlay graphical data* untuk semua responden yang terlibat dalam penelitian ini, Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014) pada Gambar 5. Terlihat bahwa distribusi posisi lingkaran merah sebagai temuan penelitian ini, lingkaran kuning temuan Nurfitriani (2014) dan lingkaran biru temuan Herlambang (2014) memiliki pola yang sama, yaitu menunjukkan korelasi positif antara persentase jumlah penduduk yang dapat diselamatkan dan persentase dana total yang terpakai dalam proses evakuasi.

Selain menunjukkan pola yang sama, distribusi posisi lingkaran berwarna hasil keputusan tindakan

evakuasi untuk semua responden yang terlibat dalam penelitian ini, Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014) memberikan wilayah yang berisi paling banyak lingkaran berwarna (kotak pada Gambar 5) sebagai modus data diskrit yang memberikan estimasi ketakpastian hasil percobaan pengambilan keputusan tindakan evakuasi penduduk. Kotak tersebut memberikan prediksi posisi pengambilan keputusan darurat bencana yang akan diberikan oleh responden baru di luar responden penelitian ini. Peluang terbesar menemukan posisi lingkaran berwarna sebagai hasil keputusan tindakan evakuasi penduduk oleh responden baru yang dipilih secara random dari komunitas di luar responden pada penelitian ini adalah berada dalam wilayah kotak tersebut. Dengan membuat *horizontal and vertical grid lines*, maka dapat diperoleh rata-rata persentase penduduk yang bisa diselamatkan dan rata-rata persentase dana total terpakai.



**Gambar 5.** Keputusan tindakan evakuasi dari semua responden dengan data latar dari responden Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014).

Untuk penelitian ini, diperoleh hasil rata-rata jumlah penduduk yang dapat diselamatkan adalah  $47 \pm 12\%$  dengan biaya operasional  $27 \pm 7\%$  dari dana total. Penelitian sejenis dengan fokus indikator yang berbeda, yaitu Nurfitriani (2014) memperoleh hasil  $55 \pm 12\%$  populasi terselamatkan dengan biaya operasional mencapai  $32 \pm 7\%$  dari dana total yang tersedia, sedangkan Herlambang (2014) menemukan  $45 \pm 12\%$  populasi terselamatkan dengan biaya operasional mencapai  $27 \pm 7\%$  dari dana total. Berdasarkan estimasi ketakpastian hasil semua percobaan pada Gambar 4.9 di atas jelas terlihat bahwa ada *overlapping results* untuk semua responden penelitian yang mengindikasikan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara temuan penelitian ini, Nurfitriani (2014) dan Herlambang (2014).

## PENUTUP

### Simpulan

Indonesia adalah negara yang berada di lingkaran cincin api Pasifik, karena itu memiliki deretan gunung berapi aktif dan rawan mengalami bencana letusan. Upaya terpadu untuk mengatasi bencana letusan gunung

berapi belumlah optimal, sehingga diperlukan terobosan dalam pendidikan tinggi untuk memasukkan studi mitigasi dan pengelolaan bencana dalam struktur kurikulum sains universitas sebagai salah satu cara efektif untuk turut berpartisipasi dalam upaya mereduksi dampak dan resiko letusan gunung berapi. Dalam konteks ini, penelitian ini mempelajari simulasi monitoring emisi gas  $SO_2$  sebagai salah satu indikator letusan dengan memanfaatkan program *Eruption* (Barclay *et al.*, 2011) yang mensimulasikan bencana letusan gunung berapi. *Eruption* memiliki tiga instrumen terpadu monitoring aktivitas vulkanik, yaitu *cospec* untuk mengukur emisi  $SO_2$ , *seismometer* untuk mengukur frekuensi gempa vulkanik, dan *geodimeter* untuk mengukur deformasi lapisan tanah. Monitoring terpadu dilakukan sebagai dasar penetapan status bahaya bencana yang diperlukan sebagai bagian dari mekanisme pengambilan keputusan darurat tanggap bencana yang cepat dan tepat.

Penelitian ini melibatkan 16 orang responden mahasiswa strata satu untuk mensimulasikan bencana letusan dengan beberapa temuan utama penelitian adalah sebagai berikut: 1) Proses-proses geofisika dan geokimia adalah proses-proses yang mengontrol aktivitas magmatik dan letusan gunung berapi; 2) Semakin tinggi level gas  $SO_2$  yang dilepaskan per hari, maka semakin besar peluang letusan gunung berapi; bersama dengan frekuensi gempa vulkanik merupakan indikator utama letusan; 3) Mekanisme pengambilan keputusan darurat yang cepat, tepat, dan akurat berdasarkan informasi terukur yang diberikan oleh instrumen monitoring memberikan hasil bahwa 47% jiwa dapat diselamatkan dengan membutuhkan 27% biaya operasional dari dana total yang tersedia.

### Saran

Sehubungan dengan program *Eruption* sebagai instrumen utama penelitian yang berbasis *web* dan *on-line running*, kesulitan teknis akses internet yang lambat dan tidak stabil di FMIPA Unesa ditemui saat pelaksanaan penelitian. Kesulitan teknis yang lain adalah minimnya ketersediaan data lapangan tentang aktivitas gunung berapi di Indonesia. PVMBG sebagai badan resmi pemerintah yang relevan dengan masalah vulkanologi dan mitigasi bencana kebumihan tidak memberikan rincian data yang komprehensif sebagai bahan pembandingan dalam situs resmi PVMBG. Dengan mempertimbangkan keterbatasan responden penelitian, untuk penelitian lanjutan sejenis jumlah responden harus lebih banyak agar konsistensi hasil percobaan simulasi bencana letusan teruji; apakah persentase populasi terselamatkan dan persentase dana total terpakai berada di sekitar harga yang diperoleh dalam penelitian ini ataukah jauh berbeda dan berada di luar jangkauan harga yang dilaporkan dalam

Barclay *et al.* (2011). Perlu juga dilaksanakan penelitian lanjutan dengan melibatkan mahasiswa pasca untuk menguji apakah level pengetahuan kognitif mahasiswa bisa mempengaruhi hasil-hasil percobaan simulasi bencana letusan ataukah tidak.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Aydan, O. 2008. Seismic and tsunami hazard potential in Indonesia with a special emphasis on a Sumatra Island. *Journal of The School of Marine Science and Technology*, Tokai University, Vol.6, No.3, pp.19-38.
- Baeda, A. Y. 2011. Seismic and tsunami hazard potential in Sulawesi Island Indonesia. *Journal of International Development and Cooperation*, Vol.17, No.1, pp.17-30.
- 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.
- Brune, S., Babeyko, A.Y., Ladage, S. and Sobolev, S. V. 2010. Landslide tsunami hazard in the Indonesian Sunda Arc. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.10, pp.589-604.
- FEMA, Independent Study. 2005. *Decision Making and Problem Solving*. US Department of Homeland Security. pp.1-122.
- 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
- Madlazim. 2011. Towards Indonesian tsunami early warning system using rapid rupture duration calculation. *The Science of Tsunami Hazards*, Vol.4, No.30, pp.233-242
- 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.