

## ANCAMAN BAHAYA LETUSAN GUNUNG API SKALA BESAR DAN MONOGENESIS DI INDONESIA

S. Bronto dan R. Setianegara

Pusat Survei Geologi  
Jl. Diponegoro 57 Bandung 40122

### SARI

Indonesia mempunyai banyak gunung api yang berpotensi menimbulkan bencana bagi manusia dan lingkungan hidup di sekitarnya. Usaha mitigasi sudah dilakukan terhadap 128 gunung api aktif, yang jenis potensi ancaman bahayanya sudah diketahui berdasarkan pada lokasi sumber bahaya dan sejarah kegiatan. Namun demikian, ancaman bahaya letusan gunung api yang lebih besar, yang membentuk kaldera letusan atau kaldera longsoran masih memerlukan penelitian. Begitu pula terhadap potensi ancaman bahaya gunung api monogenesis, yang dapat membentuk lubang letusan baru di luar gunung api aktif. Pemikiran ini dilandasi oleh kenyataan bahwa sampai sekarang belum ada letusan besar setara G. Tambora 1815 dan G. Krakatau 1883, namun kegiatan tektonika yang menimbulkan tsunami dan gempa bumi besar sudah sering terjadi. Kedua, erupsi gunung api lumpur Sidoarjo berlangsung cukup lama dan kawasan gunung api semakin dipadati oleh pemukiman serta kegiatan usaha.

Kata kunci: bahaya, gunung api, kaldera, letusan, longsoran, monogenesis

### ABSTRACT

*Indonesia has a lot of volcanoes which their potentially hazards threaten people and environment. Mitigation efforts have been conducting to 129 active volcanoes where source locations and types of hazard are relatively well defined, mainly based on historical records. However, volcanic hazards due to larger eruptions, such as caldera explosions and gigantic volcanic debris avalanches, still require basic geological data. This also includes potentially hazard studies on monogenetic volcanoes, that may form a new vent at outside of the present active volcano. This idea is proposed based on facts that there has no a large scale explosion since the Tambora 1815 and Krakatau 1883 eruptions, but large scale tectonic activities have frequently occurred recently causing big tsunamis and earthquakes. Secondly, Sidoarjo mud volcano has been erupting for long time, and volcanic areas are occupied for living and business, intensively.*

*Key words: hazard, volcano, caldera, explosion, avalanche, monogenetic*

### PENDAHULUAN

Indonesia sudah sangat terkenal sebagai negara yang mempunyai banyak gunung api. Para ahli kebumihan sudah sangat memahami bahwa kemunculan gunung api itu berhubungan erat dengan kegiatan tektonik, yang diwujudkan dalam kejadian gempa bumi tektonik. Pada dekade 2000 – 2010 ini, baik di Indonesia maupun di dunia, sudah dan sedang banyak terjadi gempa bumi tektonik dengan besaran

5,9 Skala Richter. Dalam jangka pendek gempa bumi tektonik itu dapat diikuti tsunami, sehingga keduanya menyebabkan bencana yang menelan korban manusia dan harta benda sangat banyak. Sekalipun masih kontroversi, pembentukan gunung api lumpur Sidoarjo kemungkinan tidak lepas sama sekali dari dinamika bumi berupa gempa bumi

tektonik yang terjadi berulang kali dan dalam skala besar. Dalam jangka panjang kegiatan tektonik berskala besar itu dapat menyebabkan peningkatan kegiatan gunung api yang pada akhirnya juga menimbulkan bencana bagi manusia dan lingkungan di sekitarnya. Hal ini sangat memerlukan perhatian mengingat kegiatan tektonik itu dapat menyebabkan letusan gunung api yang sangat besar, sehingga terbentuk kaldera letusan ataupun kaldera longsoran gunung api. Kaldera letusan (explosion caldera) adalah kaldera yang terbentuk sebagai akibat letusan sangat besar dari suatu gunung api, mempunyai nilai indeks letusan gunung api lebih dari 5 (Newhall dan Self, 1982; Simkin and Siebert, 1994). Sebagai contoh letusan G. (Gunung api) Tambora pada 1815 (Neuman van Padang, 1951; Kusumadinata, 1979), yang terletak di Pulau Sumbawa Provinsi Nusa Tenggara Barat. Kaldera longsoran terbentuk karena longsornya tubuh kerucut gunung api, seperti yang pernah terjadi di Mount St. Helens, Amerika Serikat

pada 18 Mei 1980 (e.g. Lipman and Mullineaux, 1981). Jenis kaldera gunung api yang lain adalah kaldera amblesan, yang dapat terjadi pada gunung api bersusunan basal, seperti halnya di G. Fernandina, Kepulauan Galapagos (Simkin dan Siebert, 1994), di antara Samudera Pasifik dengan Benua Amerika Selatan. Kaldera amblesan ini kurang dikenal di Indonesia karena pada umumnya batuan gunung apinya bersusunan andesit.

Dalam skala lebih kecil kegiatan tektonik dan dinamika magma di bawah permukaan dapat menimbulkan gunung api baru, yang disebut gunung api eksentrik monogenesis (Macdonald, 1972). Gunung api tersebut terletak di luar gunung api aktif yang sudah ada, kegiatannya hanya satu kali periode dan masa hidupnya sangat pendek untuk ukuran waktu hidup gunung api pada umumnya, apalagi waktu geologi. Dengan demikian gunung api monogenesis ini berukuran lebih kecil dibanding dengan gunung api kerucut komposit dan kaldera. Sebagai contoh G. Paricutin dan G. Surtsey (Macdonald, 1972). G. Paricutin terletak di Meksiko, Amerika tengah, yang muncul di kebun jagung pada tahun 1943 dan giat hingga tahun 1952, namun pada saat ini sudah tidak aktif lagi. G. Surtsey di Islandia meletus pada tahun 1963 sampai dengan 1966. G. Anyar di Kompleks G. Lamongan, Jawa Timur meletus pada tahun 1898 (Kusumadinata, 1979). G. Tidar di Magelang juga diperkirakan sebagai gunung api monogenesis, yang terbentuk pada masa pra-sejarah.

Kegiatan gunung api berupa kaldera letusan, kaldera longoran dan gunung api monogenesis memang jarang terjadi, tetapi sekali kejadian akibatnya akan sangat merusak. Risiko bencana menjadi sangat tinggi karena pemukiman dan pengusahaan sumber daya di kawasan gunung api semakin meningkat. Risiko bencana sangat tinggi dapat pula terjadi apabila gunung api monogenesis muncul di tengah-tengah daerah pemukiman yang sangat padat penduduknya. Munculnya gunung api lumpur Sidoarjo masih menjadi perdebatan ilmiah mengenai keterkaitannya dengan aktivitas gunung api. Namun jika hipotesis adanya kubah lava gunung api terpendam di kedalaman 2,76 km benar (Ikawati, 2010), maka bencana gunung api lumpur Sidorajo juga masih berhubungan dengan dinamika magmatisme dan vulkanisme.

Makalah ini ditujukan untuk mengungkapkan kemungkinan terjadinya letusan gunung api berskala

besar dan monogenesis, yang jarang terjadi dan di luar kebiasaan, sebagai akibat terjadinya gempa bumi tektonik berskala besar, khususnya di Indonesia. Secara umum, gempa bumi yang dapat memicu terjadinya kegiatan gunung api adalah gempa bumi yang dapat menimbulkan sesar bukaan mulai dari lokasi sumber magma sampai dengan permukaan bumi (Acocella dan Neri, 2003). Sesar bukaan menyebabkan tekanan pada sumber magma menurun sehingga magma menjadi lebih aktif serta bergerak ke permukaan melalui bidang rekahan di daerah busur gunung api. Tujuan itu dimaksudkan untuk mengajak para pemerhati kebencanaan supaya meningkatkan penelitian dan mitigasi bencana letusan gunung api yang sangat merusak tersebut. Kegiatan ini sangat penting agar kita sudah menyiapkan diri apabila kemungkinan terburuk itu benar-benar terjadi. Apalagi pada saat ini masyarakat internasional sedang menghadapi perubahan iklim global, yang di beberapa bagian dunia menimbulkan bencana besar, baik berupa banjir dan tanah longsor, maupun kekeringan dan kebakaran. Sekalipun tidak diharapkan, adalah hal yang dapat terjadi, setelah bencana gempa bumi, tsunami, dan perubahan iklim global kemudian diikuti dengan letusan gunung api berskala sangat besar, yang menurut Newhall dan Self (1982), serta Simkin dan Siebert (1994) disebut juga letusan kolosal atau paroksismal.

Pembahasan di dalam makalah ini hanya dibatasi terhadap tiga ancaman bahaya letusan gunung api, yakni letusan sangat besar sehingga terbentuk kaldera letusan dan kaldera longoran gunung api, serta erupsi gunung api eksentrik monogenesis. Untuk memperkirakan daerah mana yang berpotensi terancam bahaya letusan gunung api tersebut dilakukan pengolahan data gempa bumi tektonik berskala  $\geq 5,9$  Skala Richter. Daerah yang paling berpotensi terancam bahaya letusan gunung api adalah daerah yang paling banyak atau paling sering diguncang oleh gempa bumi tektonik berskala besar tersebut. Pada daerah yang sering diguncang gempa bumi besar itu dibuat penampang untuk mengetahui kedudukan sumber gempa berskala  $\geq 5,0$  Skala Richter. Dari penampang ini dapat diketahui ada tidaknya pola gempa bumi yang mencerminkan gerakan magma dari sumber menuju ke permukaan bumi di dalam jalur gunung api. Data gempa bumi dikumpulkan sejak tahun 2000 sampai dengan Januari 2011, yang bersumber dari Badan Geologi Amerika Serikat dan Badan Klimatologi, Meteorologi dan Geofisika (BKMG), Jakarta.

## Ancaman Bahaya Letusan Gunung Api

Letusan gunung api beskala sangat besar sudah lama tidak terjadi setelah letusan G. Tambora pada 1815 dan G. Krakatau 1883. G. Tambora terletak di Pulau Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat dan G. Krakatau berada di Selat Sunda, Provinsi Lampung. Kejadian letusan gunung api kolosal dengan indeks letusan gunung api (VEI: *Volcanic Explosivity Index*) bernilai 6-7 tersebut sudah banyak dipublikasikan, antara lain oleh Verbeek (1885), Neuman van Padang (1951), Kusumadinata (1979), Simkin dan Fiske (1983), serta Simkin dan Siebert (1994). Bencana letusan gunung api yang sangat besar itu tidak hanya mengakibatkan kerusakan secara lokal dan regional, tetapi juga mempunyai dampak negatif terhadap kehidupan di dunia. Pada letusan G. Tambora korban jiwa diperkirakan lebih dari 80.000 orang sedangkan G. Krakatau menelan korban 36.000 orang. Daerah sekitar gunung api yang terkena dampak letusan mempunyai radius hingga ratusan kilometer. Apabila letusan dahsyat itu terjadi pada saat ini niscaya ratusan ribu bahkan mungkin jutaan orang akan menjadi korban.

Sekalipun kejadian letusan gunung api yang membentuk kaldera di dalam sejarah, terhitung sejak tahun 1600, sampai saat ini baru dua kali, tetapi kaldera gunung api yang terbentuk pada masa pra-sejarah atau pada umur Kuartar ternyata sangat banyak dan tersebar di semua busur gunung api di Indonesia. Sebagai contoh Kaldera Toba dan Maninjau di Sumatera, Kaldera Dano, Sunda, Tengger dan Ijen di Jawa, Kaldera Buyan-Bratan dan Batur di Bali serta Kaldera Rinjani di Lombok (Bronto dan Sudarsono, 2003). Di Kepulauan Banda antara lain terdapat Kaldera Banda dan di Sulawesi Utara terletak Kaldera Tondano.

Pembentukan kaldera letusan gunung api terjadi setelah tahap pembangunan kerucut gunung api komposit terlampaui, kemudian diikuti oleh waktu istirahat sangat panjang. Selama waktu istirahat itu magma berkomporsi basa-menengah di bawah gunung api mengalami diferensiasi menjadi magma menengah-asam yang menghasilkan gas gunung api dalam jumlah banyak. Apabila gas tersebut terperangkap di bawah batuan penudung maka semakin lama tekanannya semakin tinggi. Letusan kaldera terjadi apabila tekanan gas gunung api itu sudah lebih besar dari pada kekuatan batuan penudung, yang berupa tubuh gunung api komposit. Volume bahan erupsi sangat besar, sebagai contoh letusan G. Krakatau 1883 mencapai 18 km<sup>3</sup>

(Verbeek, 1885; Simkin dan Fiske, 1983), dan G. Tambora 1815 lebih dari 100 km<sup>3</sup> (Neumann van Padang, 1951; Kusumadinata, 1979).

Berdasarkan data statistik gunung api komposit berkomporsi basa-menengah mempunyai waktu hidup rata-rata 240.000 tahun dan maksimum 1,3 juta tahun. Sedangkan yang berkomporsi menengah-asam mempunyai waktu hidup rata-rata 600.000 tahun dan maksimum 1,8 juta tahun (Ferari, 1995). Untuk gunung api tipe kaldera tunggal waktu hidup rata-ratanya adalah 846.000 tahun sedangkan kaldera jamak lebih lama lagi (3,778 juta tahun). Waktu istirahat pada tahap pembangunan (*construction periods*) gunung api komposit, baik yang berkomporsi basa, menengah maupun asam, rata-rata kurang dari 300 tahun. Gunung api kaldera tunggal dan jamak mempunyai jangka waktu istirahat minimum masing-masing 1.467 tahun dan 85.000 tahun. Untuk di Indonesia, data umur waktu hidup dan waktu istirahat yang tidak tercatat dalam sejarah (sebelum tahun 1600 SM), apalagi untuk kaldera gunung api, masih sangat sedikit. Misalnya, Kaldera Tengger, yang terdiri atas Kaldera Ngadisari dan Kaldera Lautan Pasir, masing-masing terbentuk pada umur sekitar 152.000 tahun yang lalu dan 33.000 tahun yang lalu (Zaennudin, 1990).

Longsoran gunung api adalah proses longsornya tubuh bagian atas kerucut gunung api menuju ke arah tertentu sehingga dari samping bentuknya seperti kerucut terpancung, dan dari atas membentuk kaldera atau kawah seperti tapal kuda (*a horse shoe-shaped caldera or crater*). Longsoran gunung api ini mempunyai beberapa istilah, antara lain longsoran raksasa (*gigantic landslides*), *volcanic debris avalanches* (Siebert, 1984) dan *catastrophic rock-slide avalanches* (Voight dkk., 1981).

Pada umumnya longsoran gunung api ini bersamaan dengan erupsi letusan menyamping karena di dalam atau di bawah kawah puncak terdapat sumbat lava yang sangat kuat. Kegiatan longsoran gunung api terkini terjadi pada Mount St. Helens, Amerika Serikat pada 18 Mei 1980 (e.g. Lipman and Mullineaux, 1981). Longsoran gunung api model Mount St. Helens pada masa sejarah cukup sering terjadi, antara lain di G. Unzen (1792) dan G. Bandai (1888), Jepang; G. Bezymianny (1956) dan G. Shiveluch (1964) di Kamchatka, Rusia; serta G. Augustine (1883), Alaska (Siebert, 1984). Di Indonesia longsoran gunung api yang tercatat dalam sejarah terjadi di G. Papandayan pada 1772 (Kusumadinata, 1979). Namun demikian, dari

penyelidikan geologi gunung api diketahui hampir semua kerucut gunung api komposit di Indonesia pernah mengalami longsoran besar pada masa prasejarah (Bronto, 2001). Sebagai contoh longsoran G. Galunggung di Jawa Barat pada 4200 tahun yang lalu (Bronto, 1989) telah membentuk *The Ten Thousand Hills of Tasikmalaya*.

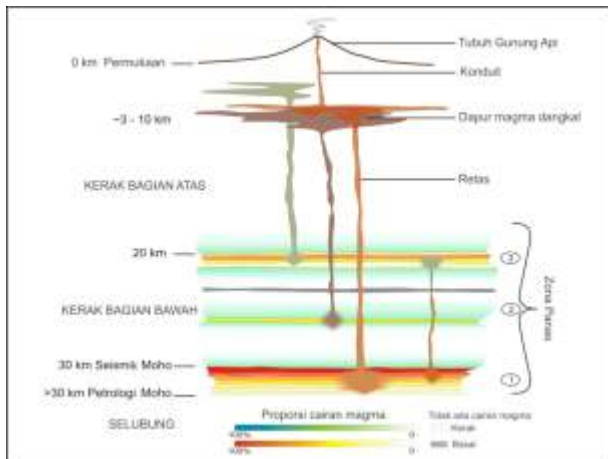
Longsoran gunung api paling besar yang diketahui di Indonesia terjadi pada G. Gadung-Raung di Jember Jawa Timur (Neumann van Padang, 1939; Siebert dkk., 1997). Jarak luncur maksimum lk. 90 km hampir mencapai pantai selatan dan endapan menutup daerah seluas 1085 km<sup>2</sup>, dengan ketebalan rata-rata 30-50 m mengisi lembah di antara G. Iyang-Argopuro dengan Pegunungan Selatan. Sekalipun derajat bahaya longsoran gunung api ini sedikit di bawah letusan kaldera gunung api, tetapi akibat terhadap manusia dan lingkungan di sekitarnya juga sangat fatal (Bronto dan Hartono, 2002).

Letusan gunung api melalui lubang letusan baru di luar tubuh gunung api yang disebut erupsi eksentrik dan tercatat dalam sejarah terjadi pada G. Anyar di kaki baratdaya G. Lamongan, Klakah, Lumajang Jawa Timur pada 1898 (Kusumadinata, 1979; Neumann van Padang, 1951). Secara geologi, erupsi eksentrik gunung api monogenesis seperti G. Anyar tersebut, baik berupa letusan maar, pembentukan kubah/aliran lava maupun kerucut sinder, atau bahkan gunung api lumpur banyak dijumpai di Indonesia. Selain di sekitar G. Lamongan, maar juga dijumpai di kaki G. Tengger (Grati, Pasuruan), kaki G. Semeru, Jawa Timur, dan di kaki G. Muria, Jawa Tengah (Bronto dan Mulyaningsih, 2007). Di kaki timurlaut G. Cerme, di sebelah selatan kota Cirebon terdapat maar Setu Patok dan di lereng selatan ada Situ Sangiang (Bronto dan Fernandy, 2000). Pada daerah peralihan antara dataran pantai utara Jawa Barat - Banten dengan deretan gunung api di selatannya juga terdapat bekas maar, yang sudah berupa danau atau situ dan rawa, serta diperkirakan juga gunung api lumpur (Bronto, 2009). Di luar Jawa, maar antara lain dijumpai di kaki G. Gamalama, di dekat Kota Ternate, Provinsi Maluku Utara (Bronto dkk., 1982). Derajat letusan gunung api eksentrik monogenesis ini tidak sebesar kaldera letusan dan longsoran gunung api, namun paling tidak daerah dengan radius 30-50 km dapat terkena dampaknya. Korban manusia dan harta benda menjadi lebih banyak lagi apabila gunung api baru itu muncul di daerah padat pemukiman.

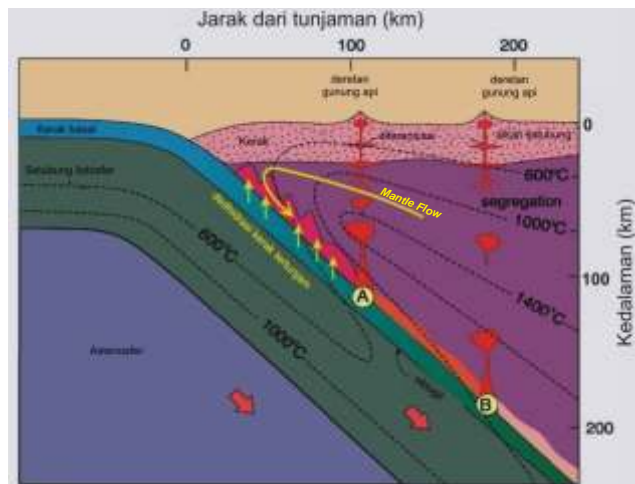
### Lokasi dan Kedalaman Gempa Tektonik

Gempa bumi tektonik dalam (kedalaman > 100 km), yang bersumber di selubung bumi, dan berskala besar (> 5,9 Skala Richter), dapat menyebabkan terjadinya peleburan sebagian dari material selubung bumi menjadi magma primer. Bahan selubung bumi yang padat, bertemperatur tinggi dan bertekanan besar, karena pengaruh gempa bumi tektonik itu mengalami penurunan tekanan tetapi temperatur tetap tinggi sehingga terjadi perubahan sebagian dari bahan selubung bumi dari zat padat menjadi zat cair, yang dalam hal ini adalah magma. Magma itu naik menuju waduk atau dapur magma secara diapir atau melalui sistem retas (Gambar 1). Pembentukan magma di daerah penunjaman kerak bumi disajikan pada Gambar 2. Gempa bumi tektonik di kedalaman menengah (kedalaman 33 – 100 km), yang terletak di antara selubung bagian atas dan kerak bumi bagian bawah dapat mengaktifkan kembali magma yang sudah terakumulasi di dalam dapur magma dalam atau membentuk zona rekahan yang menjadikan jalan bagi magma untuk bergerak lebih ke atas lagi dari dapur magma dalam menuju ke dapur magma dangkal. Gempa bumi dangkal (kedalaman < 33 km) menyebabkan zona rekahan (sesar bukaan) yang dapat menjadi jalan naiknya magma ke permukaan bumi sebagai wujud erupsi gunung api. Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara gaya tarik sebagai akibat kegiatan tektonik dengan proses erupsi melalui kawah pusat dan pada lereng serta kaki G. Etna pada 2001 (Acocella dan Neri, 2003). Pada gunung api yang sudah lama tidak meletus dan di dalam dapur magma telah terjadi diferensiasi sangat lanjut dari magma basa menjadi magma menengah dan asam, yang menghasilkan gas gunung api bertekanan sangat tinggi maka hal itu dapat menimbulkan letusan gunung api sangat besar sehingga terbentuk kaldera letusan. Kemungkinan lain, karena adanya sumbat lava yang sangat kuat sehingga magma tidak dapat keluar melalui lubang erupsi yang sudah ada, maka magma akan mencari jalan lain yang lebih lemah di lereng gunung api. Hal ini akan menyebabkan terjadinya kaldera longsoran gunung api model Mount St. Helens. Kemungkinan lain magma keluar melalui zona lemah di luar tubuh gunung api sehingga menimbulkan letusan gunung api eksentrik monogenesis.



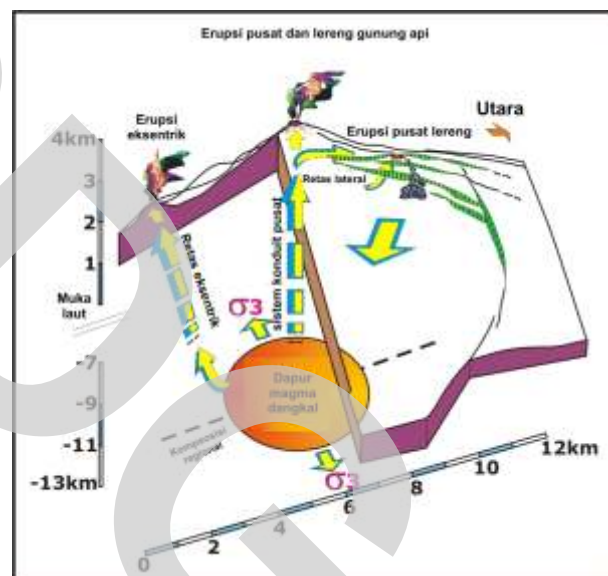


Gambar 1. Proses pembentukan magma gunung api yang dimulai dari selubung bumi bagian atas sampai dengan kerak bumi bagian bawah, untuk kemudian magma naik melalui sistem retas menuju ke dapur magma dangkal, sebelum keluar sebagai erupsi gunung api (Williams dan MacBirney, 1979).



Gambar 2. Pembentukan magma di daerah penunjaman kerak bumi menurut Tatsumi dkk. (1983). Dari lokasi penunjaman magma bergerak secara diapir menuju dapur magma dalam yang terletak di batas antara selubung bumi dan kerak bumi, atau menerus ke dapur magma menengah dan dangkal di dalam kerak bumi sebelum keluar ke permukaan bumi sebagai erupsi gunung api.

Dari kejadian gempa bumi tektonik berskala besar di Indonesia sejak tahun 2000 sampai dengan Januari 2011, dapat dibagi menjadi 7 segmen daerah regional gempa bumi (Tabel 1). Segmen daerah yang paling sering mengalami gempa bumi besar tersebut adalah Bengkulu – Nangro Aceh Darussalam (NAD), yakni sebanyak 14 kali, disusul segmen Maluku-Banda 9 kali, Papua 7 kali dan Jawa Barat 5 kali. Di Selat Sunda (Banten-Lampung) gempa bumi tektonik besar berjumlah 4 kali, sedangkan di Yogyakarta-Jawa Tengah dan Nusa Tenggara masing-masing 2 kali. Sekalipun di Segmen Maluku-Banda gempa bumi besar menduduki urutan kedua, namun kebanyakan berupa gempa bumi dalam (105 -165 km) dan di kawasan Laut Banda yang sangat dalam pula. Apabila terjadi pembentukan magma di dalam selubung bumi maka pergerakannya ke dasar Laut Banda memerlukan waktu yang sangat lama dan kemungkinan hanya berupa gunung api basal dasar laut dalam. Dengan demikian potensi terjadinya erupsi letusan sangat dahsyat sangat kecil. Sementara itu jumlah gempa bumi tektonik di daerah Papua menempati urutan ketiga, tetapi di daerah ini tidak ada busur gunung api Kuarter. Kemungkinan gaya yang bekerja bersifat kompresif sehingga kemungkinannya adanya ancaman bahaya gunung api dapat diabaikan. Gempa bumi besar di segmen daerah yang lain hanya 2 kali atau kurang. Potensi bahaya letusan gunung api akan semakin tinggi jika daerah itu semakin sering terkena gempa bumi



Gambar 3. Proses keluarnya magma dari dapur magma dangkal menuju kawah puncak dan kawah samping menurut Acocella dan Neri (2003). Magma dapat keluar melalui rekahan pada sistem conduit pusat dan retas samping sebagai akibat adanya gaya tarik. Magma yang keluar melalui conduit pusat dapat menyebabkan erupsi pada kawah puncak dan erupsi lateral pada lereng atas. Sementara magma yang keluar melalui retas samping dapat membentuk erupsi eksentrik.

berskala besar. Apabila asumsi ini dijadikan dasar maka daerah regional Bengkulu – NAD mempunyai potensi bahaya letusan gunung api tertinggi, yang kemudian disusul daerah Jawa Barat dan Banten-Lampung.

Tabel 1. Daftar kejadian gempa bumi tektonik berskala besar (  $\geq 5,9$  SR) di Indonesia sejak tahun 2000. (Sumber BKMKG.)

Segmen Gempa	Waktu Kejadian	Lokasi	Sekala Richter dan Kedalaman
<b>Bengkulu-Aceh</b>	1. 04/06/2000	Bengkulu	7,3 SR – 33 km
	2. 24/12/2004	NAD & Sumtra Utara	8,2 SR – 30 km
	3. 28/03/2005	Nias, Sumatra Utara	8,7 SR – 30 km
	4. 30/09/2009	0,84 LS - 99,65 BT. 57 km NW Pariaman Padang, Sumatra Barat	7,9 SR - 71 km
	5. 07/04/2010	2,33 LU 97,02 BT, 75 km SE Sinabang, Aceh.	7,2 SR – 34 km
	6. 09/05/2010	Aceh, mengguncang Meulaboh, berpusat di 66 km SW Meulaboh, 110 km SW Blangpidie, 126 km NW Labuhanhaji, 138 km NW Sinabang.	7,2 SR – 30 km
	7. 24/07/2010	1,02 LU-99,50 BT, 18 km NW Panyabungan Mandailing Natal	
		3,76 LS 101,8 BT 36 km SW Lais	
		3,61 LS 99,93 BT 78 km SW Pagai Selatan Mentawai	6,0 SR – 10 km
		3,16 LS 100,23 BT 30 km SW Pagai Selatan Mentawai	
	8. 04/09/2010	3,43 LS 100,20 BT 48 km SW Pagai Selatan Mentawai	6,0 SR – 28 km
	9. 25/10/2010	4,68 LS 101,16 BT, 157 km SW Bengkulu	7,2 SR – 10 km
	10. 26/10/2010	2,39 LU 96,21 BT, 32 km SW Sinabang, NAD	
		5,29 LS 102,47 BT, 115 km SW Bintuhan Bengkulu	6,2 SR – 30 km
	11. 26/10/2010		6,0 SR – 39 km
	12. 02/01/2011		5,9 SR – 13 km
	13. 15/01/2011		5,9 SR – 32 km
	14. 18/01/2011		6,5 SR – 10 km
<b>Ujungkulon-Selat Sunda (Banten – Lampung)</b>	1. 21/12/1999	Pandeglang, Banten	6,0 SR –
	2. 4/09/2009	SW Ujung Kulon	6,2 SR – 23 km
	3. 16/10/2009	6,79 LS – 105,11 BT, lk. 42 km SW Ujung Kulon Banten	6,5 SR – 55,6km
	4. 13/12/2010	6,60 LS 103,74 BT, 158 SW Krui, Lampung	5,9 SR – 25 km
<b>Jawa Barat</b>	1. 2000	Sukabumi	?
	2. 2005	Gunung Halu, Bandung Selatan	?
	3. 17/07/2006	Pangandaran	6,8 SR – 26 km
	4. 2/09/2009	8,24 LS – 107,32 BT, 142 km SW Tasikmalaya	7,3 SR - 30 km
	5. 26/06/2010	118 km selatan Tasikmalaya	6,3 SR -34 km
<b>Yogyakarta – Jawa Tengah</b>	1. 27/05/2006	DIY dan Klaten, Jateng	5,9 SR – 10 km
	2. 7/09/2009	10,33 LS 110,62 BT, 263 km SE Wonosari, DIY	6,8 SR - 35 km
<b>NTB-NTT</b>	1. 12/11/2004	Alor, NTT	6,0 SR –
	2. 09/11/2009	Bima NTB, Lokasi: Labuhan Bajo NTT, 139 km NE Sumbawa Besar NTB, 206 km NW Ruteng NTT, 208 km NW Taliwang NTB, 8,316 LS dan 118,697 BT	6,7 SR -18,3 km
<b>Maluku-Banda</b>	1. 24/10/2009	Maluku Tenggara Barat (MTB) dan Maluku Barat Daya (MBD), 209 km NW Saumlaki, 6,23 LS – 130,60 BT.	7,3 SR - 165 km
	2. 21/07/2010	Maluku, 2,97 LU 128,04 BT, 254 NE Ternate	
		1,26 LU-126,38 BT, NW Ternate	6,3 SR - 105 km
		225 km NE Ternate	
	3. 03/08/2010	192 km NW Saumlaki	6,4 SR – 10 km
	4. 08/10/2010	210 km SW Tual	6,2 SR – 110 km
	5. 12/11/2010	8,06LS 129,70 BT, 180 km SW Saumlaki	6,1 SR – 159 km
	6. 17/11/2010	6,78 LS 130,04 BT, 194 km SW Saumlaki	6,4 SR – 128 km
	7. 17/11/2010	7,64 LS – 129,10 BT, 249 km SW Saumlaki	6,0 SR – 30 km
	8. 08/12/2010		6,0 SR – 156 km
	9. 15/12/2010		6,1 SR – 191 km
<b>Papua</b>	1. 10/10/2002	Papua	7,4 SR – 10 km
	2. 6/02/2004	Nabire, Papua	6,9 SR – 10 km
	3. 26/11/2004	Nabire, Papua	6,4 SR – 10 km
	4. 19/06/2010	Serui Papua	7,3 SR – 13 km
	5. 30/09/2010	4,94 LS 133,9 BT 141 km SE Kaimana,	7,4 SR – 25 km
		4,85 LS 133,83 BT 131 km SE Kaimana	
	6. 12/10/10	4,57 LS 134,09 BT 106 km SE Kaimana	6,3 SR – 10 km
	7. 03/11/2010		6,0 SR – 50 km
<b>Sulawesi Utara</b>	-	-	-

Berdasarkan kedalaman gempa maka pada gempa dalam magma masih jauh di dalam bumi sehingga untuk bergerak hingga mencapai permukaan bumi memerlukan waktu cukup lama. Sebaliknya, kalau sumber gempa berada di kedalaman dangkal mungkin pergerakan magma ke permukaan akan lebih cepat. Hal yang cukup menarik untuk dicermati bahwa di segmen Bengkulu-Aceh ada kecenderungan gempa bumi semakin mendangkal dimulai pada kedalaman 71 km di Padang, Sumatera Barat, kemudian disusul pada kedalaman sekitar 30 km di Meulaboh dan Sinabang, NAD, serta 10 km di Kabupaten Natal Mandailing, Sumatera Utara serta Bengkulu. Berdasarkan data dari BKMKG, sampai dengan Januari 2011 di daerah Bengkulu - NAD juga banyak terjadi gempa bumi tektonik dengan kekuatan > 5 Skala Richter. Sebagai contoh dalam waktu 3 hari berturut-turut, yakni dari 15 sampai dengan 18 Januari 2011 di wilayah Sinabang, NAD, telah terjadi gempa bumi sebanyak 5 kali pada 5,0 – 5,9 Skala Richter dengan kedalaman 32-10 km. Pusat gempa terletak di darat yang tersusun oleh endapan aluvium dan batuan gunung api Kuartar. Pada wilayah yang sama, gempa bumi terkini terjadi pada 26 Januari 2011, jam 22:42:30, posisi 2,10 LU dan 96,76 BT, besarnya 5,8 Skala Richter pada kedalaman 21 km. Oleh sebab itu kawasan gunung api di daerah Bengkulu – NAD, perlu dilakukan penelitian yang mendalam dan peningkatan kegiatan pemantauan.

Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara gempa bumi tektonik dengan kegiatan G. Merapi di Jawa Tengah. Gempa bumi tektonik dan patahan disebabkan oleh menunjammnya kerak Samudera Hindia di bawah Pulau Jawa. Melalui zona lemah (rekahan) magma dari zona subduksi dapat bergerak miring menuju G. Merapi sehingga terjadi erupsi pada 2006. Hal serupa agaknya terjadi pula pada letusan 1982 G. Galunggung di daerah Tasikmalaya Jawa Barat. Letusan tersebut didahului oleh gempa bumi tektonik pada 1979 dan 1981, yang berpusat di Samudera Hindia di selatan Tasikmalaya. Menurut Siswawidjojo (komunikasi lisan) sumber gempa bergerak miring semakin dangkal dari Samudera Hindia di selatan Tasikmalaya menuju G. Galunggung. Informasi ini menjadi sangat berharga untuk mengantisipasi seringnya terjadi gempa bumi tektonik di sebelah barat Bengkulu – Aceh, sebagai akibat penunjaman kerak Samudera Hindia di bawah Pulau Sumatra dan patahan, dan kemungkinan menimbulkan letusan gunung api di daerah antara Bengkulu – NAD.

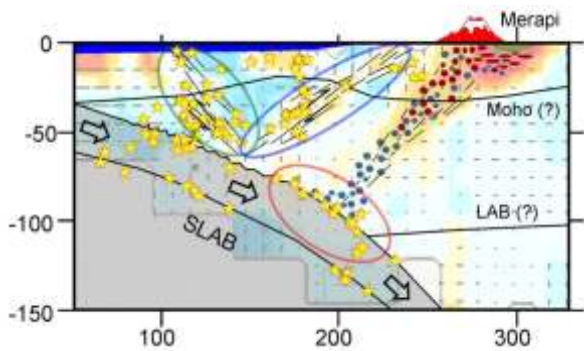
## Evolusi Bahaya Letusan Gunung Api

Berdasarkan kejadian gempa bumi tektonik di atas maka daerah yang paling berpotensi terancam bahaya letusan gunung api adalah daerah Bengkulu – NAD, Jawa Barat dan Kawasan Selat Sunda, Provinsi Banten serta Provinsi Lampung. Selain bahaya letusan gunung api yang secara normal sering terjadi, maka perlu juga diwaspadai kemungkinan terjadinya kaldera letusan, kaldera longoran dan gunung api baru eksentrik monogenesis. Di daerah Bengkulu - NAD, kawasan potensi bahaya letusan gunung api adalah di sepanjang lajur Bukit Barisan. Di wilayah itu banyak dijumpai gunung api Kuartar yang sudah beristirahat lama, baik berupa gunung api komposit maupun tipe kaldera, seperti halnya Kaldera Maninjau di Sumatra Barat, Kaldera Toba di Sumatera Utara dan Danau Laut Tawar (?) di Takengon, NAD. Untuk lebih melokalisir daerah bahaya gunung api masih diperlukan analisis tektonik yang lebih rinci guna mengetahui terdapat sesar aktif membuka (*extensional faults*), terutama yang terletak di kawasan gunung api kaldera dan komposit yang sudah lama tidak meletus. Lokasi sesar aktif membuka di kawasan busur gunung api itulah yang diperkirakan menjadi tempat keluarnya magma ke permukaan atau terjadinya letusan gunung api.

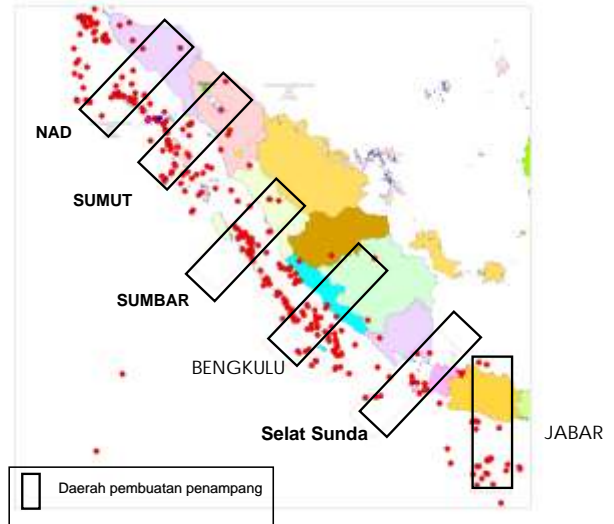
Untuk mengantisipasi terjadinya gunung api eksentrik monogenesis, maka analisis sesar aktif dan membuka juga perlu dikembangkan ke daerah perbatasan antara gunung api Kuartar dengan dataran di sekitarnya. Di daerah itu dimungkinkan terjadi kontak antara sumber panas (magma) dan air bawah permukaan yang dapat menimbulkan letusan gunung api eksentrik monogenesis.

Gambar 5 menunjukkan sebaran gempa bumi tektonik mulai dari NAD sampai dengan Jawa Barat, berkekuatan > 5 Skala Richter, yang dikompilasi sejak 1974 dari Badan geologi Amerika Serikat. Untuk memberikan gambaran sebaran pusat-pusat gempa bumi di bawah permukaan bumi dibuat penampang seperti terlihat pada Gambar 6 dan 7.

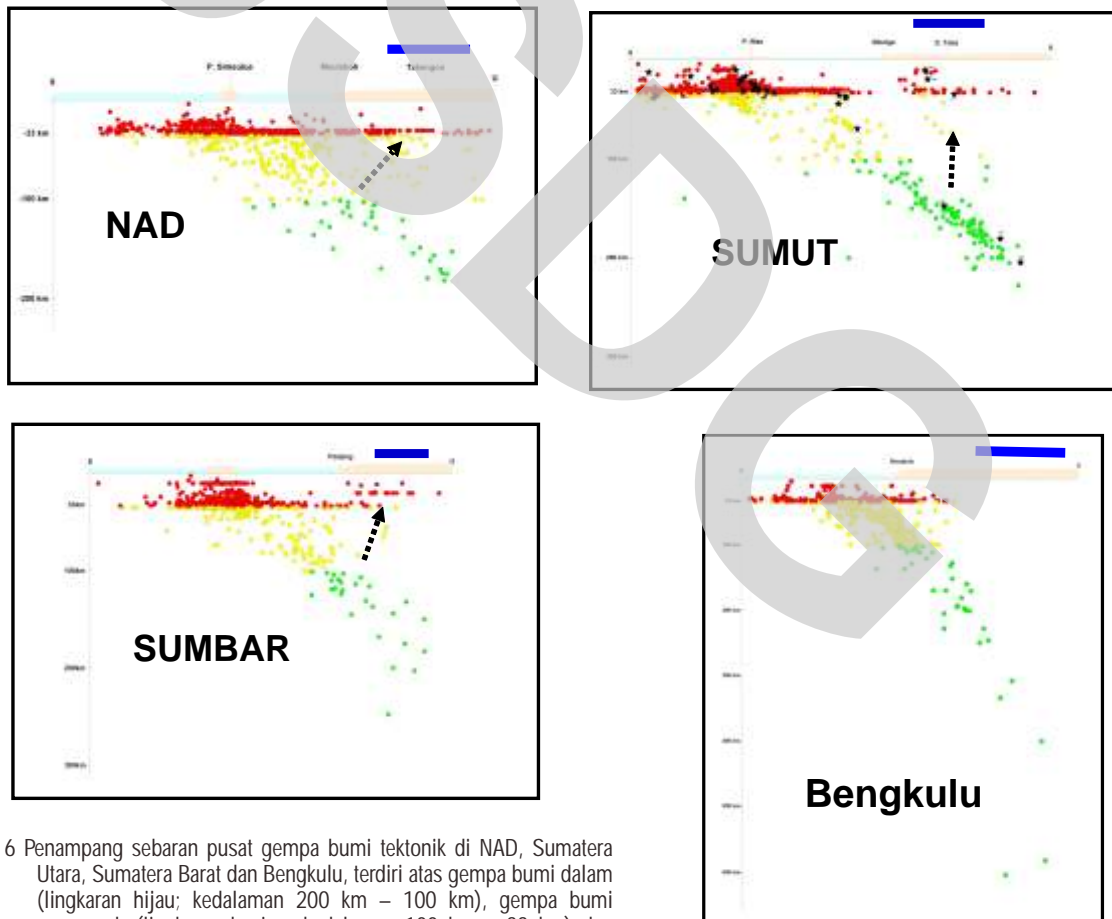
Pada Gambar 6 nampak bahwa pusat gempa bumi tektonik menengah dan dangkal menyebar mulai dari bawah Samudera Hindia di sebelah barat hingga di bawah Takengon, NAD. Selain gempa bumi itu menyebabkan terbentuknya sesar aktif dan zona rekahan, dikhawatirkan zona lemah itu juga dilalui oleh magma untuk naik ke permukaan sebagai manifestasi erupsi gunung api. Gejala yang serupa nampaknya terjadi juga di Sumatera Barat. Untuk di



Gambar 4. Hubungan gempa bumi tektonik pada zona subduksi dengan terbentuknya sesar di daerah Bantul Yogyakarta serta aktivitas G. Merapi. Melalui zona lemah (rekahan) magma dari zona subduksi dapat bergerak miring menuju G. Merapi sehingga terjadi erupsi pada 2006. Sumber data: Meramex GFZ (Luehr, 2007).

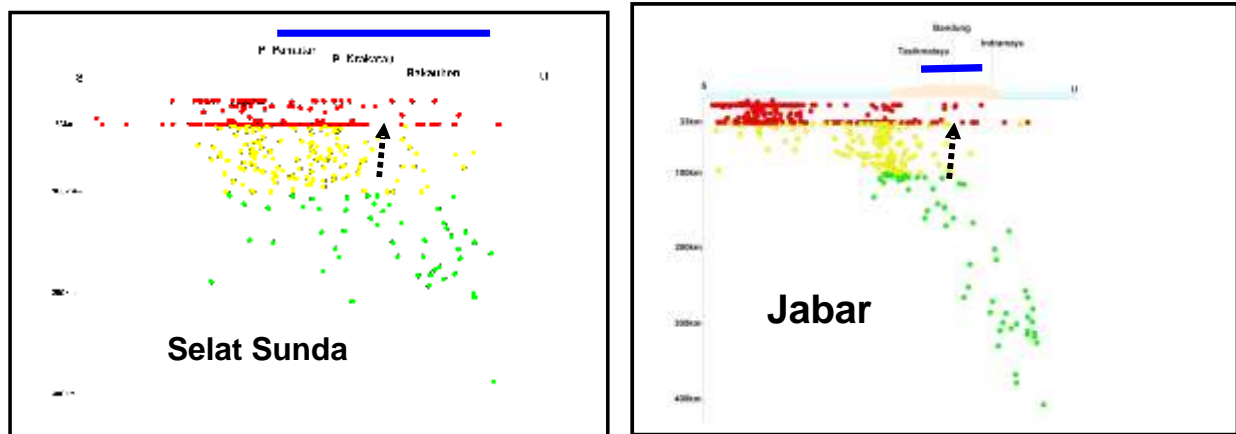


Gambar 5. Sebaran gempa bumi tektonik (lingkaran merah) mulai dari NAD sampai dengan Jawa Barat, berkekuatan > 5 Skala Richter, yang dikompilasi sejak 1974 dari Badan geologi Amerika Serikat.



Gambar 6 Penampang sebaran pusat gempa bumi tektonik di NAD, Sumatera Utara, Sumatera Barat dan Bengkulu, terdiri atas gempa bumi dalam (lingkaran hijau; kedalaman 200 km – 100 km), gempa bumi menengah (lingkaran kuning; kedalaman 100 km – 33 km) dan gempa bumi dangkal (lingkaran merah; kedalaman < 33 km). Bintang hitam adalah gempa bumi tektonik terkini berkekuatan > 5,9 Skala Richter di Sumatera Utara. Anak panah menunjukkan kemungkinan arah gerakan magma menuju ke busur gunung api di jalur Bukit Barisan. ■ Busur Gn. Api





Gambar 7. Penampang sebaran pusat gempa bumi tektonik di kawasan Selat Sunda dan Jawa Barat, terdiri atas gempa bumi dalam (lingkaran hijau; kedalaman 200 km – 100 km), gempa bumi menengah (lingkaran kuning; kedalaman 100 km – 33 km) dan gempa bumi dangkal (lingkaran merah; kedalaman < 33 km). Anak panah menunjukkan kemungkinan arah gerakan magma menuju ke jalur gunung api di kawasan selat Sunda dan Jawa Barat. **Busur Gn. Api**

Sumatera Utara, bahkan kecurigaan terjadinya pergerakan magma dimulai dari adanya gempa bumi dalam menuju daerah di sekitar Danau Toba. Indikasi meningkatnya kegiatan gunung api di daerah Sumatera Utara ditunjukkan oleh letusan G. Sinabung pada 27 dan 29 Agustus 2010. Sejak 1600 M gunung api itu belum pernah meletus sehingga hanya dimasukkan ke dalam gunung api aktif tipe B. Namun karena letusan 2010 tersebut statusnya menjadi gunung api aktif tipe A. Menurut informasi dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, yang ditayangkan oleh mass media elektronik, pada bulan Januari 2011 ini gempa bumi di G. Sinabung sangat sering terjadi bahkan mencapai 30 kali per hari. Letusan G. Sinabung dan informasi kegempaan itu hendaknya menjadi peringatan dini bahwa tidak menutup kemungkinan di waktu mendatang akan terjadi lagi erupsi gunung api di kawasan ini, apakah dari G. Sinabung sendiri atau gunung api yang lain.

Potensi bahaya letusan gunung api berskala besar di Jawa Barat sudah dilaporkan penulis di dalam Jurnal Geoaplika ITB (Bronto, 2009). Di dalam Gambar 7 nampak bahwa pusat gempa bumi tektonik menengah dan dangkal, yang bersumber dari gempa bumi dalam, juga ada yang mengarah ke daratan Jawa Barat. Daerah ini mempunyai banyak gunung api, mulai dari umur Tersier hingga Kuartar masa kini, termasuk tipe kaldera. Sebagai contoh Kaldera Sunda di sebelah utara Bandung, Kaldera Jatiluhur di Purwakarta, dan Kaldera Ciantenherang di dekat tambang emas Pongkor. Bahkan cekungan Bandung sendiri dicurigai sebagai kaldera jamak. Agaknya gunung api di daerah ini sedang mengalami istirahat

panjang, terbukti selama ini tidak ada letusan yang cukup besar. Dari analisis citra landsat diketahui di sebelah utara Bandung terdapat pola kelurusan melengkung ke utara mulai dari daerah Cianjur-Jatiluhur di sebelah barat laut, Subang di bagian utara dan timurlaut G. Tampomas – Majalengka di sebelah timur laut. Kelurusan tersebut agaknya merupakan Sesar Cimandiri di daerah Bandung bagian barat-barat laut, Sesar Krawang Selatan dan Sesar Subang di sebelah utara, serta Sesar Baribis di sebelah timurlaut (Martodjojo, 2003). Sesar Cimandiri dan Sesar Baribis merupakan sesar naik, masing-masing ke arah barat laut dan ke timurlaut. Sementara itu Sesar Krawang Selatan dan Sesar Subang yang terletak di sebelah utara bergerak naik ke utara. Apabila seluruh sesar itu dihubungkan maka nampak adanya pola sesar naik sangat besar cembung ke utara yang dinamakan sesar Bandung Raya. Sementara itu di sebelah selatan sistem sesar itu, selain terdapat banyak sesar yang lain, seperti Sesar Padalarang, Sesar Lembang dan Sesar Tampomas atau Sesar Kuningan-Cilacap (Katili dan Sudradjat, 1984), juga tersebar banyak gunung api. Pola cembung ke utara dan naik ke barat laut-utara-timurlaut menunjukkan adanya gaya yang bersumber dari satu tempat tetapi menekan dengan pola sebaran seperti kipas ke arah barat laut, utara, dan timurlaut. Keadaan ini tentunya tidak semata-mata sebagai akibat gaya tektonika mendatar dari selatan, tetapi dimungkinkan merupakan resultante dengan gaya vertikal yang berasal dari bawah Cekungan Bandung dan sekitarnya. Salah satu kemungkinan gaya vertikal itu dari magma yang sedang membangun tenaga (*heating up*). Hal itu lebih didukung dengan

banyaknya gunung api aktif masa kini yang terpusat di wilayah Bandung dan sekitarnya dan pada saat ini sedang tidur panjang. Apabila gaya tektonik yang berarah mendatar masih dominan maka potensi bencana gempa bumi saja yang mengancam daerah Jawa Barat. Sebaliknya jika nantinya gaya vertikal yang lebih kuat dan itu disebabkan oleh magma yang sedang menekan dan bergerak ke atas maka akan terjadi bencana yang sangat dahsyat berupa letusan kaldera gunung api. Sementara itu di bagian utara Jawa Barat juga dimungkinkan terjadinya letusan gunung api monogenesis (maar) dan gunung api lumpur.

Selain Gunung api Krakatau di Selat Sunda daerah Provinsi Banten dan Lampung juga banyak terdapat gunung api yang sedang beristirahat panjang. Kaldera Dano telah meletus besar menghasilkan Tuf Banten (van Bemmelen, 1949), sedang di Lampung dikenal adanya Tuf Lampung atau Formasi Lampung (Andi Mangga dkk., 1994). Dari analisis citra satelit, diketahui salah satu sumber erupsi Tuf Lampung adalah kaldera Pra Rajabasa, yang sekarang ditempati oleh Gunung api Rajabasa di selatan Kalianda, ibukota Kabupaten Lampung Selatan (Bronto dan Poedjoprajitno, 2010). Data tersebut menunjukkan di kawasan Banten-Lampung ini juga mempunyai potensi bahaya letusan gunung api kaldera. Reaktivasi atau perulangan letusan kaldera adalah hal yang umum terjadi di daerah gunung api, sebagai contoh di G. Krakatau sendiri, Kaldera Tengger di Jawa Timur dan Kaldera batur di Bali.

Bahaya letusan gunung api yang tergolong kecil (VEI 4) mungkin tidak terlalu bermasalah bagi para ahli gunung api di Indonesia, karena mereka sudah banyak pengalaman menanganinya. Namun apabila potensi bahaya gunung api lebih besar, hingga terjadi longsoran model Mount St. Helens atau bahkan letusan kaldera maka cara penanggulangannya harus sangat hati-hati. Skenario lain adalah letusan membentuk gunung api eksentrik monogenesis. Letusan ini mengikuti jalur lemah/tersesarkan di kaki atau dataran di sekitar gunung api yang ada, boleh jadi muncul melalui lapangan solfatara, fumarola atau lokasi mata air panas yang ada. Kalau hal ini terjadi di daerah/dekat pemukiman maka cara penanggulangannya juga harus lebih hati-hati.

Untuk mengetahui kemungkinan-kemungkinan letusan gunung api yang akan terjadi, maka perlu dilakukan penelitian dan pemantauan secara intensif di daerah tersebut. Penelitian geologi gunung api

diperlukan untuk mengetahui karakter kegiatan gunung api pada waktu lampau, apakah pernah terjadi kaldera letusan dan kaldera longsoran gunung api, serta erupsi eksentrik dan kemungkinan perulangannya pada masa mendatang. Penelitian sesar aktif dan kegempaan dalam melokalisir daerah bukaan, yang dapat menjadi jalan keluarnya magma dari dalam bumi ke permukaan. Penelitian ini kemudian diikuti oleh kegiatan pemantauan baik secara geofisika maupun geokimia. Hal itu penting untuk lebih meyakinkan ada tidaknya indikasi naiknya magma dari dalam bumi menuju ke permukaan. Berhubung penunjaman kerak Samodra Hindia ke kerak Benua Eurasia bersudut landai, sehingga memungkinkan terbentuk magma akibat pelelehan kerak granitik, maka pemantauan geokimia terhadap unsur-unsur radioaktif juga sangat disarankan. Dengan demikian apabila benar ada gerak-gerak magma menuju ke permukaan, maka erupsi gunung api dapat diantisipasi sedini mungkin.

### Kesimpulan dan Saran

- Gempabumi tektonik berskala 5,9 dapat memicu pembentukan kaldera letusan dan kaldera longsoran gunung api, serta letusan bukaan baru.
- Prioritas kawasan rawan bahaya letusan gunung api tersebut diperkirakan adalah daerah Bengkulu-NAD, Jawa Barat dan Banten-Lampung.
- Untuk menghadapi kemungkinan ancaman bahaya letusan gunung api yang dapat menimbulkan bencana sangat besar itu diperlukan penelitian dan mitigasi secara terpadu dan berkelanjutan.

### Ucapan Terima Kasih

*Dengan tersusunnya makalah ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada sdr. Novan yang telah membantu menyiapkan komputerisasi data. Ucapan terimakasih juga ditujukan kepada Sdr. A. Suhaemi, yang telah memberikan masukan selama penyusunan makalah ini. Penghargaan juga disampaikan kepada panitia PIT-IAGI 2010, yang telah menerima dan menyetujui tulisan ini untuk dipresentasikan. Penghargaan ditujukan kepada para penelaah, yang telah memberikan masukan dan saran sehingga makalah ini dapat diterbitkan.*

## ACUAN

- Acocella, V. and Neri, M., 2003. What makes flank eruptions ? The 2001 Etna eruption and its possible triggering mechanisms, *Bull. Volcanol.*, 65, 517-529.
- Andi Mangga, S., Amiruddin, Suwarti, T., Gafoer, S. dan Sidarto, 1994. *Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatera, skala 1 : 250.000*, Puslitbang Geologi, Bandung.
- Bronto, S., 1989. Volcanic Geology of Galunggung, West Java, Indonesia, PhD thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, N.Z., 490.
- Bronto, S., 2001. Volcanic debris avalanches in Indonesia, *Proceed. The 3rd Asian Sympos. On Engin. Geol. And the environ. (ASEGE)*, Yogyakarta, Sept. 3-6, 449-462.
- Bronto, S., 2009. Tinjauan geologi gunung api Jawa Barat – Banten dan Implikasinya, *Jurnal Geoaplika, FIKTM-KKGT, ITB*, 3 (2), 47-61.
- Bronto, S. dan Fernandy, A., 2000. Setu Patok sebagai gunungapi maar di daerah Cirebon, *Prosidi PIT 29 IAGI*, Bandung, Nov. 21-22, 163-172.
- Bronto, S., Hadisantono, R.D. and Lockwood, J.P., 1982. *Geologic map of Gamalama Volcano, Ternate, North Maluku, scale 1 : 25,000*, Volcanological Survey of Indonesia, Bandung.
- Bronto, S. dan Hartono, G., 2002. Longsor Gunung Api dan Bahayanya, Simposium Nasional Pencegahan Bencana Sedimen, Kerjasama Ditjend. Sumber Daya Air dengan JICA, Yogyakarta, 12-13 Maret 2002, 413-426.
- Bronto, S. dan Mulyaningsih, S., 2007. Gunung api maar di Semenanjung Muria, *Jurnal Geologi Indonesia*, 2 (1), 43-54.
- Bronto, S. dan Poedjoprajitno, S., 2010. Pengenalan gunung api purba di daerah Lampung berdasarkan analisis inderaja, makalah dipresentasikan pada Seminar PPGN-BATAN, Jakarta, 20 Oktober 2010, 18.
- Bronto, S. dan Sudarsono, U., 2003. Peta Magmatisma Kuarter, di dalam R. Sukanto, T.C. Amin dan D. Sukarna (Editors): *Atlas Geologi dan Potensi Sumber Daya energi dan Mineral Kawasan Indonesia, skala 1 : 10.000.000*, Puslitbang Geologi, Bandung.
- Ferari, L., 1995, *Data base for assessment of volcano capability*, IAEA, contract BC: 100.1010.5410.241.I.201.94CL9070.
- Ikawati, Y., 2010. Lumpur Sidoarjo: Diperlukan Penelitian Komprehensif, *H.U. Kompas*, 19 Januari 2010, hal. 14.
- Katili, J.A. and Sudradjat, A., 1984. *Galunggung : The 1982-1983 eruption*, Volc. Surv. Indon., 102.
- Kusumadinata, K., 1979. *Data Dasar Gunungapi Indonesia*, Direktorat Vulkanologi, Bandung, 820.
- Luehr, B.G., 2007, Meramex Project helps to understand the Bantul Earthquake 2006, bahan presentasi Meramex Working Group, Juli 2007, Bandung.
- Macdonald, G.A., 1972. *Volcanoes*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 510.
- Martodjojo, S., 2003. *Evolusi Cekungan Bogor, Jawa Barat*, Penerbit ITB, Bandung, 238.
- Neumann van Padang, M., 1939, Uber die vielen tausend Hugel im westlichen Vorlande des Raoeng-Vulkans (Ost Java): *De Ingenieur in Nederl. Indie Jg. 6*, no. 4, sect. 4, 35-41.
- Neumann van Padang, M., 1951. *Catalogue of the Active Volcanoes of the World Including Solfatara Fields. Part I Indonesia*, Internat. Volc. Assoc., Via Tasso 199, Napoli, Italia, 271.
- Siebert, L., Bronto, S., Supriatman, I., and Mulyana, R., 1997, Massive debris avalanche from Raung Volcano, Eastern Java, abstract, *IAVCEI General Assembly*, Jan. 19-24, 1997, Puerto Vallarta, Mexico.

- Simkin, T. and Fiske, R.S., 1983. *Krakatau 1883, The Volcanic Eruption and its Effects*, Smithsonian Institution Press, Washington, 464.
- Simkin, T. and Siebert, L., 1994. *Volcanoes of the world, 2nd ed.*, Geoscience Press inc., Tucson, Arizona, 349.
- Tatsumi, Y., Sakuyama, M., Fukuyama, H. And Kushiro, I., 1983. Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones, *J. Geophys. Res.*, 88, 5815-5825.
- Van Bemmelen, R.W., 1949. *The Geology of Indonesia*, Vol. IA, Martinus Nijhoff, the Hague, 732 p.
- Verbeek, R.D.M., 1885. *Krakatau*, Batavia, Java, 495.
- Voight, B., Glicken, H., Janda, R.J., & Douglass, P.M., 1981, Catastrophic rockslide avalanche of May 18, in P.W. Lipman & D.R. Mullineaux (Eds.), *The eruption of Mount St. Helens, Washington*, U.S. Geol. Surv. Pap., 98, 347-377.
- Williams, H. and McBirney, A.R., 1979. *Volcanology*, Freeman, Cooper & Co., San Francisco, 398.
- Zaennudin, A., 1990, The stratigraphy and nature of the stratocone of Mt. Cemorolawang in the Bromo-Tengger Caldera, East Java, Indonesia. MSc. Thesis, Researc School of Earth Sciences, Victoria University of Wellington, New Zealand, 230 p. (unpubl.).

JSDG