

Klasifikasi gunung api aktif Indonesia, studi kasus dari beberapa letusan gunung api dalam sejarah

INDYO PRATOMO

Museum Geologi, Pusat Survei Geologi, Jln. Diponegoro No. 57, Bandung, Indonesia

SARI

Indonesia dikenal sebagai negara yang mempunyai gunung api aktif terbanyak di dunia, yaitu lebih dari 30% dari gunung aktif dunia ada di Indonesia. Kawasan gunung api umumnya berpenduduk padat, karena kesuburan dan keindahan panoramanya. Hingga saat ini gunung api aktif di Indonesia dikelompokkan hanya berdasarkan sejarah letusannya, yaitu tipe A (79 buah), adalah gunung api yang pernah meletus sejak tahun 1600, tipe B (29 buah) adalah yang diketahui pernah meletus sebelum tahun 1600, dan tipe C (21 buah) adalah lapangan solfatara dan fumarola (Bemmelen, 1949; van Padang, 1951; Kusumadinata 1979). Hasil kajian terhadap sebagian dari gunung api aktif tersebut di atas memperlihatkan perbedaan karakter erupsi yang secara langsung berhubungan dengan potensi ancaman bahaya letusannya. Berdasarkan sejarah letusannya, dikombinasikan dengan karakter fisik, bentang alam puncak, struktur gunung api, dan tipe letusannya, gunung api aktif di Indonesia dapat dibedakan menjadi delapan tipe, yaitu tipe Tambora 1815 (letusan kaldera), Merapi (kubah lava), Agung (kawah terbuka), Papandayan (runtuhan dinding kawah), Batur (pascakaldera), Sangeangapi (aliran lava), dan Anak Krakatau (gunung api bawah laut).

Klasifikasi gunung api ini diharapkan akan dapat lebih memperjelas perbedaan karakteristik gunung api aktif di Indonesia, sehingga dapat dipergunakan untuk mendukung mitigasi ancaman bencana gunung api, penelitian, dan pengembangan ilmu kegunungapian dan juga meningkatkan pemahaman masyarakat terhadap gunung api aktif di Indonesia.

Kata kunci: gunung api aktif Indonesia, karakteristik, klasifikasi, mitigasi bencana gunung api

ABSTRACT

Indonesia is well known as a volcanic country, where more than 30% out of all the world volcanoes occupied this region. Volcanic region is generally densely populated, because of their soil fertility and other land use. Based on their historical eruptions noted since and before 1600 A.D., the Indonesian active volcanoes are regrouped in to A type (79 volcanoes), which were defined as volcanoes erupted since 1600 A.D., B type (29 volcanoes) erupted before 1600 A.D., and C type (21 volcanoes) are solfatar fields (Bemmelen, 1949; van Padang 1951; Kusumadinata, 1979). Studies on parts of the Indonesian active volcanoes, show different eruptive characters, which are generally related to hazard potentials. A new classification of Indonesian active volcanoes was proposed based on the combination of their physical properties, morphology, volcanic structure and eruptive styles to the eight different types, those are Tambora (caldera formation), Merapi (lava dome), Agung (open crater), Papandayan (sector failure), Batur (post-caldera activities), Sangeangapi (lava flows) and Anak Krakatau types (volcano islands and submarine volcano).

This classification would be make a better understanding to different characteristics of Indonesian active volcanoes, for the volcanic hazard and mitigation and also for the applied volcanological researches.

Keywords: Indonesian active volcanoes, characteristics, classification, volcanic hazard mitigation

PENDAHULUAN

Kawasan gunung api di Indonesia merupakan daerah pertanian yang subur dan selalu padat penduduk sejak zaman dahulu, walaupun tidak lepas dari ancaman bencana letusan. Dalam rekaman sejarah gunung api di dunia, tercatat sepuluh letusan besar yang menelan korban lebih dari 211.000 jiwa, dua di antaranya terjadi di Indonesia, yaitu Gunung Tambora tahun 1815 (lebih dari 80.000 jiwa), dan Gunung Krakatau tahun 1883 (36.000 jiwa) (Davidson & Da Silva, 2000; Pratomo & Abdurachman, 2004) (Tabel 1).

Berdasarkan catatan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, gunung api aktif di Indonesia terbagi dalam tiga kelompok berdasarkan sejarah letusannya, yaitu tipe A (79 buah), adalah gunung api yang pernah meletus sejak tahun 1600, tipe B (29 buah) adalah yang diketahui pernah meletus sebelum tahun 1600 dan tipe C (21 buah) adalah lapangan solfatara dan fumarola (Bemmelen, 1949; van Padang, 1951; Kusumadinata 1979).

Pengelompokan gunung api aktif seperti tersebut di atas, hanya berdasarkan pernah dan tidaknya gunung api tersebut meletus sejak tahun 1600, sehingga tidak menginformasikan jenis ancaman bahaya dan karakteristik gunung api tersebut secara sistematis. Klasifikasi gunung api ini dibuat agar dapat dipergunakan sebagai acuan dalam penelitian dan pengembangan gunung api aktif di Indonesia agar dapat mengantisipasi ancaman bahaya letusannya secara efektif. Data dan informasi yang dipergunakan merupakan hasil kajian dan penelitian penulis sejak tahun

1980, dengan acuan lain dari makalah, laporan, dan pustaka baik nasional maupun internasional. Selain itu, Pratomo dan Abdurachman (2004) juga pernah membahas secara singkat sebagian isi makalah ini dalam Majalah Mineral dan Energi Volume 2 Nomor 4 September 2004, terbitan Badan Penelitian dan Pengembangan Energi dan Sumber Daya Mineral.

BANGUN TUBUH GUNUNG API DAN POTENSI ANCAMAN BAHAYA LETUSANNYA

Kajian terhadap sebagian dari 129 gunung api aktif di Indonesia, terutama tipe A, yaitu gunung api yang pernah meletus setelah tahun 1600 (Van Padang, 1951 dan Kusumadinata, 1979), mengindikasikan bahwa terdapat perbedaan karakter erupsi yang secara langsung berhubungan dengan potensi ancaman bahaya letusannya. Potensi ancaman bahaya letusan gunung api berkaitan dengan keadaan bentang alam puncak (bentuk kawah), tipe dan dinamika letusannya. Ritmann (1960) menghubungkan bentuk gunung api dengan kualitas dan kuantitas magmanya (Tabel 2). Kualitas magma dinyatakan dalam kekentalannya (*viskositas*), yaitu proporsi antara mineral yang telah terbentuk dalam magma dan larutan magmatik yang tersisa pada saat terjadi proses pembekuan magma. Magma yang relatif encer (*fluid*), yang biasanya bersusunan basalt cenderung akan membentuk aliran (leleran) lava, sedangkan yang kental (*viscous*) cenderung membentuk kubah lava. Kenyataan di lapangan adalah sangat bergantung pada dinamika pembentukannya.

Tabel 1. Beberapa Letusan Gunung Api di Indonesia sejak 1500 (Davidson & Da Silva, 2000; Pratomo & Abdurachman, 2004)

No.	Gunung Api	Tahun	Letusan Eksplosif	Lahar	Tsunami	Kelaparan
1.	Kelud	1586		10.000		
2.	Tambora	1815	12.000			80.000
3.	Galunggung	1822	1.500	4.000		
4.	Awu	1826		3.000		
5.	Krakatau	1883			36.417	
6.	Awu	1892		1.532		
7.	Kelut	1919		5.110		
8.	Merapi	1930	1.300			
9.	Agung	1963	900	165		

Tabel 2. Klasifikasi Bentuk Gunung Api Kerucut Tunggal (monogenetic) dan Hubungannya dengan Kualitas dan Kuantitas Magma yang di erupsikan (modifikasi dari Ritmann, 1960)

Kualitas magma	Kuantitas magma				Jenis erupsi
	sedikit ----->	----->		banyak	
encer, sangat panas, basa	leleran lava		kubah dan lidah lava		leleran
			gunung api perisai		
			tipe Icelandite	tipe Hawaii	
kekentalan, kandungan gas dan silika (SiO ₂) bertambah	kerucut skoria dgn leleran lava	dominan leleran lava		dgn kerucut sinder parasit dan leleran lava	campuran
	kerucut piroklastika lepas dgn leleran lava	gunung api strato			
	"Crypto-dome" dgn dinding piroklastik sumbat lava	runtuhan kubah dan leleran lava	kerucut sinder dgn "crypto-dome"	dgn kerucut sinder parasit, sumbat lava dan "Crypto dome"	
kental, lebih dingin, asam	Maar', dgn piroklastik	Maar' dgn dinding (cincin) piroklastika	kawah dgn dinding melingkar dan selimut piroklastika	kaldera dgn selimut piroklastika	explosif
sangat kental dan kaya akan kristal	kepundan	kawah letusan	kaldera	volkano-tektonik	eksplosif; hanya gas

Kuantitas magma dinyatakan dalam volume magma yang di erupsikan, dinyatakan dalam meter kubik atau kilometer kubik, baik dalam bentuk material yang di erupsikan (lava atau piroklastika) atau dalam satuan yang ekuivalen dengan batuan padat (*Dense Rocks Equivalent*, DRE), yaitu dengan mengkonversikan kandungan fluidanya (gas dan abu halus). Bentuk dan struktur kawah gunung api dipengaruhi oleh geometri pipa kepundannya, yaitu dalam bentuk tabung (*central vent*) yang membentuk bentang alam gunung api kerucut tunggal (*monogenetic*), atau bentuk rekahan (*fiisure*) yang memanjang, sehingga membentuk bentang alam berupa deretan kerucut-kerucut (*polygenetic*).

Dalam pembahasan selanjutnya yang akan dipergunakan adalah sistem gunung api kerucut tunggal, karena berhubungan langsung dengan ancaman bencana yang ditimbulkannya.

Kajian terhadap bentang alam gunung api aktif dan lingkungan geologi di sekitarnya, memberikan gambaran tentang dinamika kegiatan gunung api tersebut dalam ruang dan waktu (Gambar 1). Bangun tubuh dan terjalnya lereng yang dibangun oleh material hasil letusannya mencerminkan sejarah panjang evolusi kegiatan gunung api tersebut, baik yang berkaitan dengan tipe-tipe letusan yang pernah

terjadi maupun kegiatan tektonik lokal, atau kombinasi keduanya (*volcano-tectonics*).

Kajian geologi gunung api (*geo-volcanology*) terhadap produk letusan yang dikombinasikan dengan penarikan umur, baik secara relatif maupun radiometrik dapat dipergunakan untuk mereka ulang (*reconstruction*) tipe dan mekanisme letusannya (Plini, Stromboli, Vulcano, Merapi, dan lain-lain), sehingga dapat dipergunakan untuk pemodelan dan prakiraan perulangan letusan berdasarkan periode waktu istirahatnya (*repose period*).

Pemahaman karakter dan pemantauan kegiatan suatu gunung api secara berkelanjutan, dapat menunjang usaha untuk mengurangi risiko kerugian jiwa dan harta benda akibat letusan gunung api (mitigasi).

SEJARAH ERUPSI BEBERAPA GUNUNG API INDONESIA

Erupsi gunung api di Indonesia yang berkaitan dengan pembentukan kaldera pernah pada Gunung Tambora (pulau Sumbawa) pada tahun 1815 dan Gunung Krakatau pada tahun 1883, yang dampak letusannya mempengaruhi iklim dunia, dan mendatangkan bencana geologi di beberapa bagian



Gambar 1. Beberapa bangun tubuh gunung api aktif di Indonesia, antara lain kerucut strato Gunung Merapi (kiri atas), kaldera dengan kerucut aktif Gunung Barujari di dalamnya kaldera Rinjani (kanan atas), kawah tapal kuda Gunung Papandayan (kiri bawah) dan danau kawah Gunung Kelud (kanan bawah).

bumi (Simkin & Fiske, 1983; Newhall & Dzurizin, 1988; Sigurdsson & Carey, 1989; Lipman, 1997; Kartadinata, dr., 1997; Sutawidjaja, dr., 2005), yaitu ditandai oleh terjadinya penurunan suhu pada belahan bumi bagian utara (Tabel 3).

Erupsi Gunung Papandayan 1772 dan 2002 di Jawa Barat

Rekaman sejarah letusan Gunung Papandayan mencatat setidaknya telah terjadi empat kali erupsi sejak tahun 1600, yaitu pada tahun 1772, 1923-1925, 1942, dan pada tahun 2002. Leupe (1773)

Tabel 3. Data Tinggi Asap Letusan, Beban Aerosol di Stratosfer dan Penurunan Suhu di Belahan Bumi Utara, dari Beberapa Erupsi Besar dalam Sejarah (menurut Rampino & Self, 1984)

Erupsi (Lat.), Tahun	VEI	Volume Magma (km ³)	Tinggi asap-letusan (km)	Aerosol H ₂ SO ₄ (parameter optik) (kg)	Aerosol H ₂ SO ₄ (data inti es di kutub utara) (kg)	Penurunan suhu di belahan bumi utara (°C)
Tambora (8° S) 1815	7	> 50	> 40	2 x 10 ¹¹	1,5 x 10 ¹¹	0,4 – 0,7
Krakatau (6° S) 1883	6	> 10	> 40	5 x 10 ¹⁰	5,5 x 10 ¹⁰	0,3
St. Maria (15° N) 1902	6	c. 9	> 30	< 2 x 10 ¹⁰	2 x 10 ¹⁰	0,4
Katmai (58° N) 1912	6	15	> 27	< 2 x 10 ¹⁰	< 3 x 10 ¹⁰	0,2
St. Helens (46° N) 1980	5	0,35	22	c.3 x 10 ¹⁰	-	0 – 0,1
Agung (8° S) 1963	4	0,3 – 0,6	18	1-2 x 10 ¹⁰	-	0,3
El Chichon (17° N) 1982	4	0,3 – 0,35	26	-	-	0,4 – 0,6
Laki (64° N) 1783	4	0,3 *	-	-	< 1 x 10 ¹¹	c. 1,0

VEI = Volcano Explosivity Index; * 0,3 adalah estimasi volume tefra dari Mt. Laki

dan Hageman (1823) melaporkan kejadian letusan pada bulan Agustus 1772, yaitu terjadi beberapa kali letusan besar dalam waktu 5 menit, yang disusul oleh runtuh bagian dari tubuh gunung api ini (*debris avalanche*), yang melanda kawasan seluas 250 km², memusnahkan 40 desa, dan menimbulkan korban jiwa 2.951 orang.

Keruntuhan dinding kawah Gunung Papandayan ini pada tahun 1772 diperkirakan terjadi karena dipicu oleh tekanan kegiatan kubah lava (*crypto-dome* Kawah Emas ?). Aktivitas magmatik dicirikan oleh kehadiran unsur isotop Belerang (S) disertai proses alterasi hidrotermal yang intensif dan berkelanjutan (masih berlangsung hingga saat ini). Hal ini dicerminkan oleh kegiatan solfatara dan fumarola di sekitar kubah Kawah Emas (Pratomo, 2004; Mazot & Bernard, 2004).

Taverne (1925) melaporkan bahwa terjadinya seri letusan Gunung Papandayan pada tahun 1923 sampai 1925 pada umumnya merupakan seri letusan uap (*phreatic eruptions*), yang membentuk Kawah Baru dan Kawah Nangklak.

Pada Tahun 2002 kembali terjadi erupsi yang diawali oleh letusan freatik pada tanggal 11 November 2002 pukul 16.02 WIB, disusul oleh terjadinya longsoran dinding bagian utara kawah Nangklak pada pukul 16.40. Longsoran ini terjadi karena keadaan tebing kawah telah mengalami pelapukan hidrotermal, jenuh oleh air hujan (sedang musim penghujan) dan dipicu oleh gempa bumi yang terjadi beberapa jam sebelumnya (pukul 04.52 dan 04.54), serta getaran yang terjadi akibat letusan freatik yang terjadi sejak pukul 16.02.

Seri erupsi ini berlangsung selama sepuluh hari, dan diakhiri dengan sebuah letusan tipe Volcano yang disertai dengan hempasan lateral (*directed blast*) dan runtuh (*debris avalanche*) sebagian dinding bagian dalam dari Kawah Nangklak pada 20 November 2002 (Gambar 2).

Dampak letusan ini merusak kawasan dalam radius lebih kurang 1 km dari pusat letusan, tetapi tersebar hanya di dalam kawasan kawah saja (Pratomo, 2004; Purbawinata dr., 2004).

Runtuhan bagian dinding kawah (*debris avalanche*) di Gunung Papandayan pada tahun 1772 adalah yang terbesar menurut catatan sejarah gunung api di Indonesia. Kejadian serupa pernah terjadi juga di Gunung Galunggung pada 4000 tahun yang lalu (Wirakusumah, 1982), yang menyisakan kawah berbentuk tapal kuda (*horse-shoe-shape crater*) yang kita kenal sebagai Dindingari, dan sejak saat itu kegiatan gunung api ini terpusat di kawah Walirang (Karso ?). Terbentuknya kawah tapal kuda Gunung Galunggung pada 4000 tahun yang lalu berkaitan dengan pertumbuhan kubah lava dari dalam tubuh gunung api tersebut (*Crypto-dome*), karena desakan tubuh gunung api Gunung Galunggung purba. Mekanisme kejadian ini diperkirakan mirip dengan kejadian erupsi Gunung St. Helens pada tahun 1980.

Letusan terakhir Gunung Galunggung terjadi pada tahun 1982-83, yang berlangsung secara sporadis selama lebih kurang delapan bulan, menghancurkan kubah lava Gunung Jadi dan meninggalkan danau kawah serta sebuah kerucut sinder di tengahnya.



Gambar 2. Alterasi hidrotermal pada dinding kawah tapal kuda Gunung Papandayan (kiri), memperlihatkan kondisi bagian dalam tubuh gunung api ini sebelum terjadinya longsor pada tahun 1772. Endapan letusan terarah (*directed blast*) yang terjadi pada 20 Nop. 2002, yang melekat pada sebatang pohon (kanan), mencerminkan hembusan berasal dari arah kanan foto ini.

Tambora (1815) di Pulau Sumbawa

Letusan raksasa gunung api ini yang terjadi pada tanggal 9 April 1815 melontarkan $\pm 50 \text{ km}^3$ material magmatik ke udara (dari total $\pm 150 \text{ km}^3$ material produk letusan 1815), dan endapan jatuhnya piroklastiknya menyebar hingga ke Pulau Kalimantan dan Jawa, atau lebih dari 1300 km dari pusat erupsi (Gambar 3).

Erupsi gunung api ini menyisakan kaldera berdiameter 6 sampai 7 km dengan kedalaman 1100 - 1300 m dari bibir kaldera (Gambar 4). Sebelum letusan 1815 tinggi gunung api ini diperkirakan mencapai 4000 m di atas permukaan laut (Stothers, 1984; Sigurdsson & Carey, 1989).

Berdasarkan kajian citra satelit, penelitian di lapangan dan studi pustaka, produk erupsi Gunung Tambora (1815) menyelimuti hampir seluruh permukaan semenanjung Tambora, yang terdiri atas endapan awan panas letusan yang menyebar hingga mencapai pantai Sanggar, Kananga, dan Doropeti, atau lebih kurang 30 km dari pusat erupsi (Sigurdsson & Carey, 1989; Kartadinata, 1997; Sutawidjaja drr., 2005).

Letusan ini menyebabkan jatuhnya korban 92.000 orang meninggal dunia (12.000 jiwa adalah korban akibat awan panas letusan, dan 80.000 jiwa lainnya merupakan korban karena menderita kelaparan akibat kerusakan lahan pertanian).

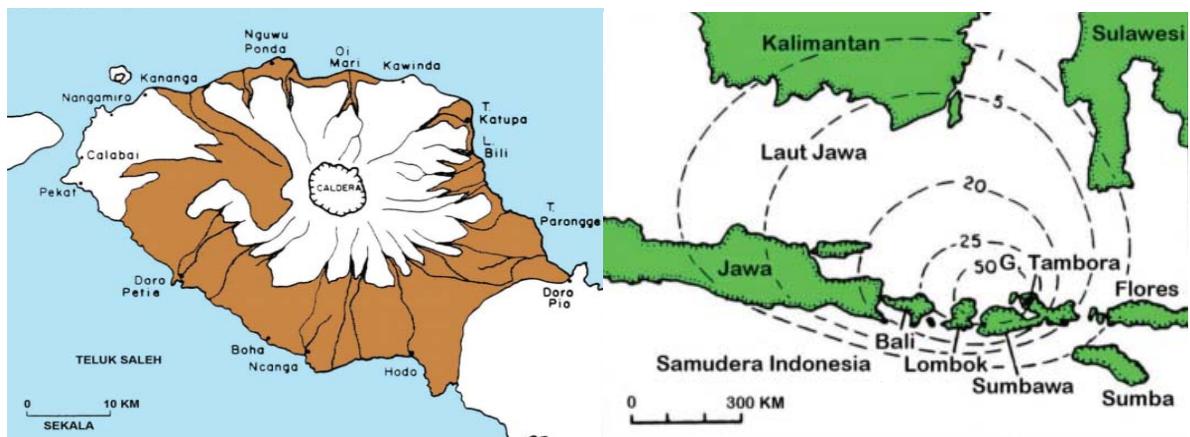
Dampak letusan Gunung Tambora (1815) sangat merusak, baik di sekitar tubuh gunung api tersebut (awan panas letusan), di daerah dan pulau-pulau

sekitarnya (jatuhan piroklastika), maupun dampak global yang mempengaruhi iklim dunia (abu-halus yang menembus stratosfer), yang menurunkan temperatur di belahan bumi bagian utara. Diyakini bahwa erupsi gunung api ini pada tahun 1815 mengakibatkan terjadinya bencana kelaparan di benua Eropa, akibat gagal panen yang dipicu tidak terjadinya musim panas pada tahun 1815 (Stother, 1984; Sutawidjaja drr., 2005).

Letusan Gunung Krakatau (1883) di Selat Sunda

Letusan Gunung Krakatau yang terjadi pada tahun 1883 melontarkan lebih dari 10 km^3 (DRE) material piroklastika, baik dalam bentuk aliran awan panas letusan maupun abu letusan. Letusan ini menyebabkan jatuhnya korban jiwa lebih dari 36.000 orang meninggal dunia, disebabkan oleh hempasan gelombang pasang (*tsunami*) yang terjadi akibat hempasan runtuhnya dinding kawah gunung api ini (*sector failure*) dan aliran awan panas letusan ke dalam laut (Simkin & Fiske, 1983; Camus *et al.*, 1984; Valentine & Fisher, 2000).

Dalam rekaman sejarah, beberapa kejadian tsunami (gelombang pasang) yang diakibatkan oleh letusan gunung api pernah terjadi di Indonesia, di antaranya yang terjadi akibat letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883 (Gambar 5) adalah yang paling merusak dan menimbulkan korban jiwa paling banyak (Tabel 4).



Gambar 3. Sebaran endapan ignimbrit produk erupsi Gunung Tambora tahun 1815 (kiri), menurut Sigurdsson dan Carey (1987), dan Peta isopach endapan abu hasil erupsi Gunung Tambora tahun 1815 (kanan), memperlihatkan sebaran endapan jatuhnya piroklastika dan ketebalannya (dalam centimeter), menurut Self drr. (1984).



Gambar 4. Panorama kaldera Tambora dilihat dari udara, memperlihatkan sisa kehebatan letusan tahun 1815, membentuk kaldera dengan diameter 6-7 km, dengan kedalaman lebih dari 1000 – 1300 m (foto: M. Halbwach).

Tabel 4. Karakteristik Bencana Tsunami yang dipicu oleh Letusan Gunung Api, yang pernah terjadi di Indonesia (Beget, 2000; Pratomo & Abdurachman, 2004)

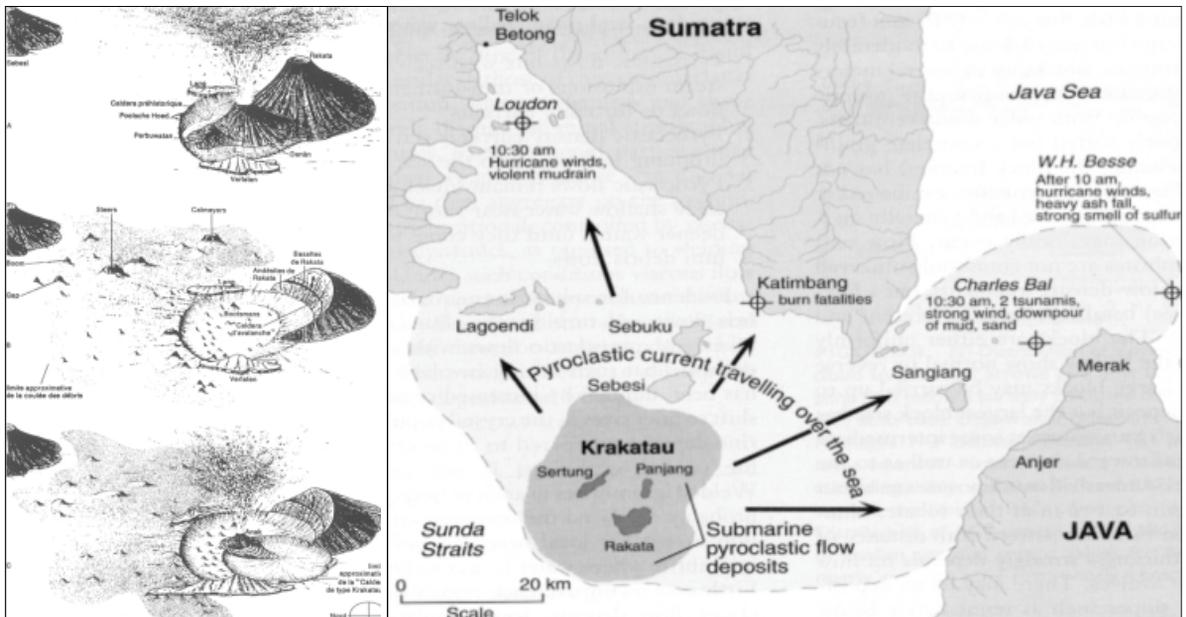
Gunung Api	Tahun	Geografi	Pemicu Tsunami	Tinggi gelombang (m)	Jangkauan rambatan (km)	Korban jiwa
Tambora	1815	pulau	Aliran piroklastika ke laut	> 10	> 100	> 10.000
Krakatau	1883	pulau	Runtuhan tubuh gunung api dan Aliran piroklastik ke laut	5 - 35	800	> 36.000
Paluweh	1928	pulau	Runtuhan tubuh gunung api ke laut	5 - 10	> 100	> 150
Iliwerung	1979	pantai	Runtuhan tubuh gunung api ke laut	9	> 100	> 500

Lahirnya Anak Krakatau 1928 di Selat Sunda

Indikasi adanya embrio Gunung Anak Krakatau diketahui dari gejala awal erupsi yang teramati sejak tanggal 29 Desember 1927 sampai 5 Januari 1928 pada posisi geografis 105° 25' 27" BT dan 6° 6' 6" LS, sebagai sebuah gunung api bawah laut pada

kedalaman 28 m di bawah permukaan laut (Stehn, 1929; Simkin & Fiske, 1983).

Munculnya kerucut baru gunung api ini di atas permukaan air laut ditandai oleh seri erupsi tipe *Surtsey* yang terjadi dari tanggal 29 Desember 1927 sampai tanggal 5 Februari 1928 (Stehn, 1929). Ke-



Gambar 5. Ilustrasi sinematika letusan Gunung Karakatau 1883 (kiri) menurut Camus dr. (1983), memperlihatkan tahapan letusan hingga terbentuknya kaldera dan sebaran endapan runtuh dinding kawah (*debris avalanche*). Sebaran arah gelombang tsunami yang ditimbulkan akibat letusan Gunung Krakatau 1883 (kanan), menurut Valentin & Fisher (2000).

giatan gunung api ini berlanjut, yang dicirikan oleh erupsi tipe Stromboli disertai aliran lava yang bersusunan basal. Gunung ini tumbuh sebagai sebuah pulau gunung api, Gunung Anak Krakatau, yang hingga saat ini telah mencapai ketinggian lebih dari 300 m di atas permukaan laut (Gambar 6).

Letusan Gunung Kelud (sepanjang abad XX) di Jawa Timur

Dalam abad XX tercatat telah lima kali letusan magmatik Gunung Kelud (1731 m), yaitu pada tahun 1901, 1919, 1951, 1966, dan 1990. Gunung api ini dikenal di dunia karena bencana lahar letusan yang



Gambar 6. Lahirnya Gunung Anak Krakatau di Selat Sunda pada tahun 1928 (kiri), memperlihatkan letusan tipe *Surtsey* (foto: Stehn, 1929), dan keadaan Gunung Krakatau saat ini yang sudah menjadi sebuah pulau gunung api (kanan), memperlihatkan letusan tipe *Stromboli*, disertai dengan aliran lava yang mencapai ke laut (foto: I.S. Sutawidjaja)

terjadi pada tahun 1919, dan menelan jiwa korban lebih dari 5.000 orang.

Kajian atas proses, tipe dan produk letusan Gunung Kelud yang terjadi pada tanggal 10 Februari 1990 memberikan kejelasan karakteristik letusan gunung api ini, yaitu bertipe *St. Vincent* dengan tinggi tiang asap letusan mencapai lebih dari 10 km, memuntahkan 150 – 200 juta m³ rempah letusan (*piroklastika*) dalam waktu yang relatif singkat (kurang dari 10 jam). Lahar letusan terjadi jika volume air danau kawah mencapai lebih dari 5 juta m³ (?), dan dampak letusan yang memusnahkan kawasan puncak gunung api ini, paling tidak dalam radius 5 km dari titik erupsi akibat *seruakan* (*surge*) awan panas letusan (Pratomo, dr. 1991; Pratomo, 1992; Bourdier dr., 1997). Setiap letusannya selalu diakhiri dengan pembentukan sumbat lava pada lubang kepundannya.

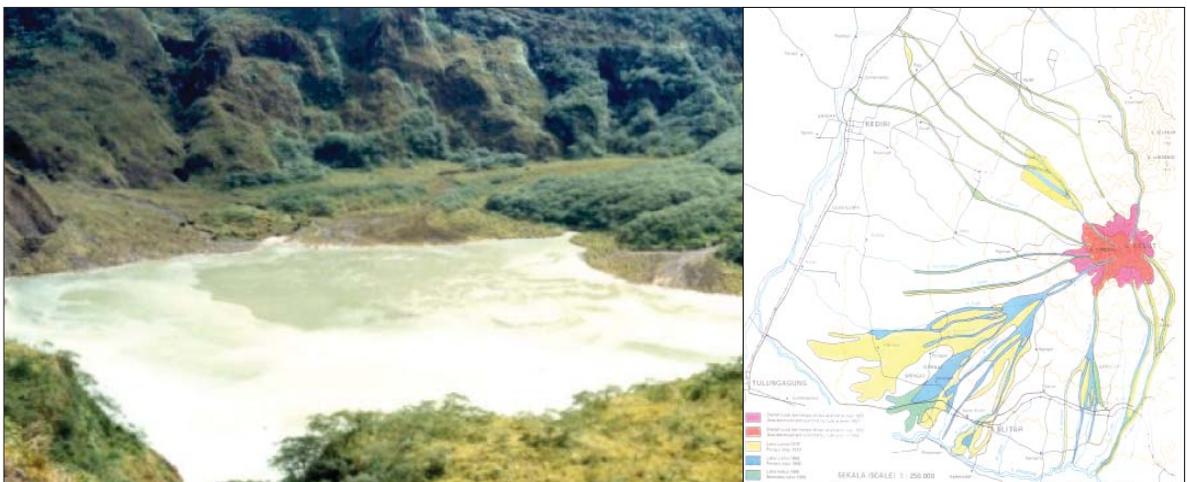
Lebih dari 30 letusan gunung api ini tercatat sejak tahun 1901. Sepanjang abad XX telah terjadi lima kali letusan dengan masa istirahat rata-rata 15 – 20 tahun. Karakteristik letusannya kurang lebih sama seperti tersebut di atas, menjadikan kegiatan gunung api ini perlu diwaspadai.

Berdasarkan kajian sekuen letusan Gunung Kelud pada tahun 1990, pada gunung api yang mempunyai danau kawah, proses erupsi selalu diawali oleh letusan uap (*freatik*), kemudian berkembang menjadi

letusan *freato-magmatik* yang disertai *seruakan* (*surge*) hingga letusan *magmatik* yang menghasilkan skoria dan batuapung, terjadi dalam waktu relatif singkat (kurang dari 10 jam).

Karakteristik sekuen endapan letusan tersebut di atas, diawali oleh endapan letusan freatik yang basah dan lembab (*humid*), tersebar dalam radius 5 – 10 km dari pusat erupsi, menyebabkan endapan sekuen letusan berikutnya (berupa batuapung, pasir, lapili dan abu) terekatkan oleh endapan freatik yang basah, sehingga menumpuk dan membebani atap bangunan dan tetumbuhan yang tertimpa endapan ini. Endapan tersebut di atas dapat mengakibatkan runtuhnya atap bangunan dan patahnya dahan dan ranting tetumbuhan akibat tidak mampu menahan beban endapan tersebut. Kejadian seperti ini menjadi penyebab tewasnya 32 orang yang berlindung di dalam gudang sebuah pabrik kopi dalam radius 10 km dari pusat erupsi (letusan Gunung Kelud pada 10 Februari 1990).

Lahar letusan tidak terjadi pada letusan tahun 1990, karena isi (volume) danau kawah pada saat terjadi letusan tidak lebih dari 2,5 juta m³ (Gambar 7) (Tabel 5). Hal ini terjadi berkat usaha pengendalian isi danau kawah dengan pembuatan terowongan yang dibangun pada tahun 1920, dan mengalami perbaikan setiap kali setelah terjadi letusan gunung api ini. Terowongan pengendali volume danau kawah



Gambar 7. Panorama danau kawah Gunung Kelud tiga bulan sebelum letusan 10 Februari 1990 (kiri), memperlihatkan bualan air yang membesar dari keadaan normal, berkaitan dengan pelepasan gas dan uap dari dasar kawah, teramati sejak tanggal 12 November 1989, dan Peta Sebaran Endapan Awan panas, Lahar letusan, dan Lahar hujan Gunung Kelud (kanan), yang terjadi sejak tahun 1901 sampai 1990 (Pratomo, 1992).

Tabel 5. Rekaman Data letusan Gunung Kelud sejak tahun 1848, memperlihatkan Hubungan Positif antara Isi Danau Kawah sebelum Letusan dan Tingkat Kerusakan Lingkungan akibat Lahar Letusan (Pratomo, 1992; Bourdier drr., 1997)

Tanggal Letusan	Volume air danau kawah (juta m ³)	Volume tepra (juta m ³)	Durasi letusan (jam)	Radius kerusakan (km)	Jangkauan lahar-letusan (km)	Jangkauan aliran awan panas (km)
16 Mei 1848	48,7	-	4	ada	27 ?	?
3-4 Januari 1864	-	-	-	-	27 ?	?
22-23 Mei 1901	-	200	-	6	27 ?	?
20 Mei 1919	40	190	-	5-7	37,5	10
31 Agustus 1951	1,8	200	11,5	4 – 6,5	-	6,5
24 April 1966	21,6	90	7	2 - 5	31	9
10 Februari 1990	2,5	130	8	1 - 5	-	5

tersebut hingga saat ini berfungsi dengan baik.

Gunung Agung (1963) di Pulau Bali

Gunung Agung, (+ 3014 m) terletak di Pulau Bali pada posisi 8° 20,5' LS dan 115° 30,5' BT, adalah sebuah gunung api strato komposit yang berbentuk kerucut dengan kawah terbuka dan dengan ukuran 625m x 425 m (Gambar 8). Kegiatannya tercatat sejak tahun 1843 (Zollinger, 1845), dan mengalami

peningkatan kegiatan solfatara terekam pada 1908, 1915 dan 1917 (Kemmerling, 1919; van Padang, 1951; Jennings, 1969; Zen, 1964; Zen & Hadikusumo, 1964; Kusumadinata, 1964; 1979).

Erupsi katastrofik Gunung Agung pada tahun 1963 dicirikan oleh 2 kali letusan besar (paroksismal), yaitu yang terjadi pada tanggal 17 Maret dan 16 Mei 1963, yang memuntahkan material berupa piroklastika dan aliran lava (Zen, 1964; Zen &



Gambar 8. Panorama kawasan puncak dan kawah Gunung Agung dilihat dari udara, memperlihatkan karakteristik bentuk kawah dari gunung api komposit dengan kawah terbuka (foto: I.S. Sutawidjaja, 2006).

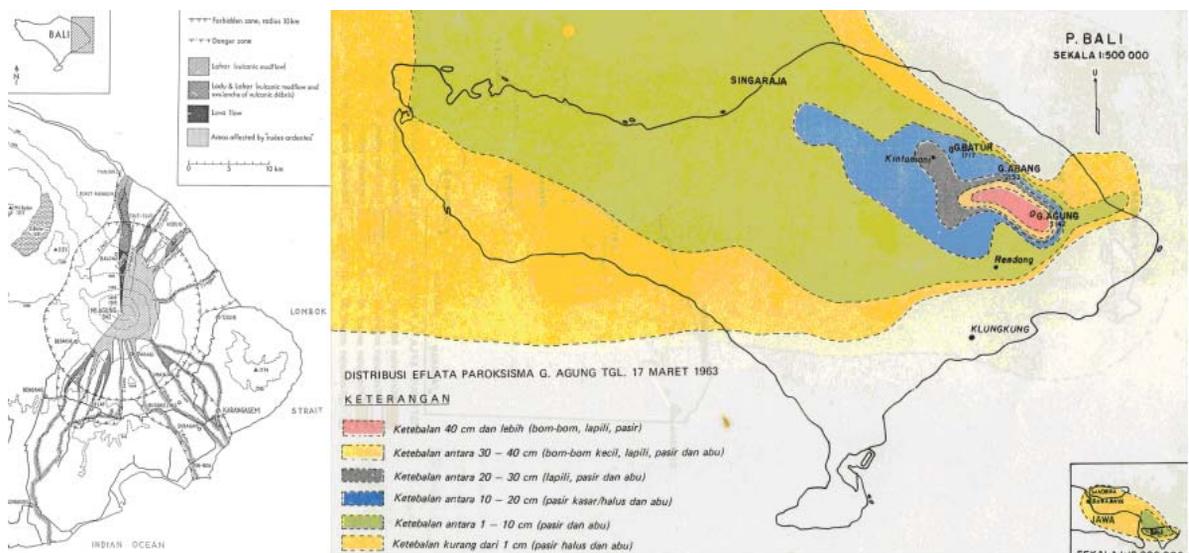
Hadikusumo, 1964; Kusumadinata, 1963;1979). Gejala awal kegiatan setelah kurang lebih 120 tahun istirahat, diketahui pada tanggal 18 Februari 1963, yaitu pada pukul 03.30 pagi, ditandai oleh suara dentuman yang disertai dengan asap letusan muncul dari kawah Gunung Agung. Kurang lebih dua jam kemudian bom-bom vulkanik berukuran kepala manusia mulai berjatuhan ke arah selatan gunung api ini. Pada tanggal 24 Februari 1963, lava pijar mulai tampak di sekitar kawah, dan mengalir ke arah lereng utara gunung api ini (Desa Tianjar), disertai dengan guguran awan-panas (*nuees ardentes*). Aliran lava berlanjut hingga pertengahan bulan Maret, dan membentuk lidah lava sepanjang kurang lebih 7,2 km, dan berhenti pada ketinggian 506 m di atas permukaan laut.

Letusan paroksismal pertama terjadi pada pukul 05.32 tanggal 17 Maret 1963, ditandai oleh kolom asap letusan berbentuk cendawan yang mencapai ketinggian 10 km di atas kawah Gunung Agung. Abu letusan gunung api ini tersebar ke arah barat, sesuai arah angin dominan pada saat itu, menutupi Bandara Surabaya di Jawa Timur (Gambar 9). Hujan abu halus mencapai ibukota Jakarta, yang berada kurang lebih 1000 km dari pusat erupsi. Letusan paroksismal ini merusak bagian puncak gunung api ini, dan membentuk celah pada bibir kawah yang terbuka ke arah selatan dan tenggara, tempat awan

panas mengalir keluar dari kepundan menuju ke lereng hingga mencapai 10 km dari pusat letusan. Setelah letusan paroksismal ini, erupsi gunung api ini mereda, dan letusan-letusan di kawah tidak terjadi pada akhir April hingga 6 Mei 1963.

Letusan paroksismal kedua terjadi pada pukul 17.00 tanggal 16 Mei 1963, membentuk kolom asap letusan mencapai lebih dari 10 km dari puncak Gunung Agung. Letusan ini terjadi setelah diawali peningkatan kegiatan vulkanik yang ditandai oleh beberapa letusan kecil pada tanggal 15 Mei pagi. Kegiatan erupsi gunung api ini kembali melemah secara berangsur sejak tanggal 17 Mei hingga berhenti pada pertengahan bulan Juni 1963. Sejak tanggal 27 Januari 1964 kegiatan gunung api ini menjadi normal kembali, yaitu berupa hembusan solfatara dan fumarola di dalam kawahnya. Produk letusan Gunung Agung 1963 terdiri atas aliran lava ($\pm 339, 3$ juta m^3), aliran piroklastika atau awan panas ($\pm 110,3$ juta m^3) dan jatuhnya piroklastika ($\pm 380, 5$ juta m^3), mengakibatkan jatuhnya korban jiwa sebanyak 1.148 meninggal dunia dan 296 luka-luka (Surjo, 1965; Kusumadinata; 1979).

Hujan lahar terjadi selama dan setelah letusan paroksismal, selaras dengan datangnya musim penghujan di kawasan Pulau Bali dan sekitarnya pada saat itu.



Gambar 9. Peta Sebaran Produk Erupsi Gunung Agung, 1963 (Zen, 1964) dan Peta Isopak Abu Letusan Gunung Agung, 1963 (Kusumadinata, 1979).

Gunung Merapi (+ 2911 m) di Jawa Tengah

Gunung Merapi terletak di Jawa Tengah pada posisi $7^{\circ} 32,5'$ LS dan $110^{\circ} 26,5'$ BT. Kegiatan gunung api ini terekam dengan baik sejak tahun 1768, atau lebih awal lagi adalah sejak tahun 1006, dikaitkan dengan sejarah Candi Borobudur. Kegiatan erupsi Gunung Merapi purba, menyisakan bentuk bentang alam tapal kuda, yang meliputi puncak-puncak Selokopo, Batulawang, Pusung London, Kendit, dan Plawangan. Kegiatan resen Gunung Merapi terpusat pada kubah Gunung Anyar, yang terletak di dataran kawah Pasarubur (+ 2500 m).

Sedikitnya enam erupsi besar pernah terjadi dalam sejarah Gunung Merapi, di antaranya pada tahun 1587, 1672, 1768, 1822, 1849, dan 1872. Letusan gunung api ini tahun 1822 menghasilkan endapan jatuhnya piroklastika yang cukup tebal di bagian barat laut dan timur laut gunung, dan endapan aliran piroklastika (awan panas letusan) mengalir ke lembah-lembah Sungai Apu, Lamat, Blongkeng, Batang, Gendol, dan Woro (Berthomier, 1990). Secara umum erupsi gunung api ini lebih bersifat eksplosif dan merusak pada abad VII hingga abad XIX. Setelah itu erupsi Gunung Merapi cenderung menjadi efusif (kecuali erupsi 1930) ditandai oleh pertumbuhan kubah lava pada puncak gunung api ini (Gunung Anyar), yang disertai guguran kubah lava yang tersebar ke arah lereng barat, barat daya, selatan, dan tenggara.

Gunung Merapi dikenal sebagai gunung api teraktif di dunia. Karakteristik erupsinya bersifat aktif permanen, yaitu guguran kubah lava atau lava pijar, membentuk aliran piroklastika (awan panas) atau '*nuee ardentes*' yang dalam bahasa setempat dikenal dengan sebutan "wedhus gembel". Kejadian ini dapat terjadi setiap saat, baik yang dipicu oleh tekanan dari dalam pipa kepundannya ataupun akibat gaya gravitasi yang bekerja pada kubah lava yang berada dalam posisi tidak stabil (pada dasar kawah lama yang miring).

Erupsi Gunung Merapi yang terjadi pada 1930 tercatat sebagai letusan yang luar biasa, ditandai oleh guguran kubah lava yang disertai letusan eksplosif, membentuk aliran awan panas hingga mencapai 13,5 km dari pusat erupsi. Awan panas ini melanda kawasan berpenghuni dan menimbulkan korban jiwa 1369 orang meninggal (Kemmerling, 1931; Escher 1933; van Padang, 1951; Abdurachman drr., 2000).

Pada umumnya kegiatan Gunung Merapi sangat khas, yaitu guguran kubah lava disertai atau tanpa erupsi eksplosif membentuk aliran awan panas hingga 8 km dari pusat erupsi. Erupsi yang relatif besar umumnya terjadi sekali dalam seratus tahun (Newhall drr., 2000)

Gunung Batur (Kaldera Batur) di Pulau Bali

Beberapa kaldera mempunyai bentuk geometri rumit, yang pada umumnya terbentuk lebih dari satu kali letusan dan memperlihatkan adanya kecenderungan amblas (*subsidence*), seperti yang terlihat di kaldera Tambora (Doro Api Toi), Batur, Rinjani, Tengger, dan lain-lain. Kegiatan pasca letusan kaldera pada umumnya ditandai oleh pembentukan kawah Maar dan kerucut-kerucut sinder (*cinder cones*), sebagai akibat seri letusan freatik dan freatomagmatik, yang material letusannya sebagian besar diendapkan di dasar kaldera itu sendiri.

Sejarah erupsi Gunung Batur merekam sebanyak 22 kali letusan sejak tahun 1800 (van Padang, 1951; Kusumadinata, 1979 dan Sutawidjaja, 2000), dan mencirikan mekanisme tersebut di atas. Kegiatan pasca kaldera dicirikan oleh erupsi yang menghasilkan lava gelas yang bersusunan basal-olivin hingga andesit-basalt ($51,15 - 54,25\% \text{SiO}_2$), yang tersebar di dasar kaldera, mengikuti pola retakan yang terdapat pada dasar kaldera ini (Gambar 10).

Potensi ancaman bahaya letusan gunung api ini ditimbulkan oleh aliran lava, bom-vulkanik (*balistik*) dan jatuhnya piroklastika (*tefra*). Kawasan rawan bahaya letusan gunung api ini, berdasarkan karakteristik tipe letusannya saat ini masih terbatas di dalam kaldera Batur saja. Beberapa gunung api yang mempunyai kemiripan karakter dengan Gunung Batur antara lain adalah Gunung Barujari (Rinjani), Gunung Bromo (Tengger), dan Doroapi Toi (Tambora).

Gunung Sangeangapi, di Pulau Sangeang, Nusa Tenggara Barat

Gunung Sangeangapi adalah gunung api strato dengan kawah aktif bernama Doro Sangeang atau Doro Api (+1842,05 m), terletak di Pulau Sangeang pada lokasi $8^{\circ} 11'$ LS dan $119^{\circ} 03,5'$ BT, di sebelah timur pulau Sumbawa.

Sejarah erupsi gunung api ini tercatat pada tahun 1512, 1715, 1860, 1911, 1927, 1953, 1964, 1985, dan 1987, yang umumnya menghasilkan leleran lava



Gambar 10. Panorama Kaldera Batur memperlihatkan tebing dinding kaldera (latar belakang), kerucut aktif Gunung Batur (tengah) dan danau Batur di bagian kanan. (foto: I.S. Sutawidjaja)

bersusunan basalan dan awan panas letusan.

Letusan gunung api (dari kawah Doro Api) hasil pemantauan pada tahun 1987 dan 1998 ini (Heryadi Rachmat, komunikasi pribadi), relatif sama dengan yang terjadi pada tahun 1985, yaitu terdiri atas lava, awan panas, jatuhan piroklastika, dan aliran lahar. Leleran yang mengisi lembah Sori Oi di barat daya menutupi lava 1985 dan mengisi lembah Sori Berano di timur laut dan menutupi lava 1964 (Gambar 11).

DISKUSI

Karakteristik Letusan dan Potensi Ancaman Bahayanya

Dalam pembahasan tersebut di atas diperoleh pemahaman tentang karakter gunung api aktif di Indonesia berdasarkan catatan dan penelitian beberapa erupsi yang pernah terjadi paling tidak sejak tahun 1772 (Gunung Papandayan) hingga saat ini. Berdasarkan kajian tersebut di atas, dapat dibedakan



Gambar 11. Panorama Gunung Sangeangapi, Pulau Sangeang, Nusa Tenggara Barat, memperlihatkan kawasan puncak gunung api ini, dengan leleran lava 1985 dan kawah aktif saat ini (foto: Heryadi Rachmat, 1998).

dengan baik beberapa karakter gunung api Indonesia, antara lain yaitu:

(1) **Letusan kaldera**, merupakan letusan raksasa dengan pelepasan energi yang sangat besar, contoh Krakatau (1883) adalah $1,81 \times 10^{26}$ erg, dan Tambora, $1,44 \times 10^{27}$ (Hedervari, 1963; Kusumadinata, 1979). Diperlukan waktu yang cukup panjang (ratusan tahun) untuk terjadinya perulangan letusan dengan karakter yang sama (kaldera). Letusan kaldera, biasanya dicirikan oleh terjadinya letusan tipe Plini atau ultra-Plini, disertai oleh aliran awan piroklastika dalam jumlah besar (beberapa km^3). Letusan Tambora (1815) menghasilkan endapan tefra (jatuhan piroklastika) mencapai 150 km^3 , sedangkan volume aliran piroklastikanya mencapai $5,7 \text{ km}^3$ (Self dr., 1984; Sigurdsson & Carey, 1989; Sutawidjaja dr., 2005). Aliran piroklastika (awan panas letusan) adalah ancaman paling merusak dan membunuh karena terjadi bersamaan dengan letusan gunung api dan mempunyai tenaga mekanik (hempas) yang sangat besar, ditunjang oleh gaya gravitasi (meluncur di lereng), sehingga dapat mencapai kecepatan lebih dari 60 km/jam dan mempunyai suhu yang dapat mencapai 800° C (magmatik). Jatuhan piroklastika tersebar menurut arah angin dominan pada saat terjadinya letusan. Fraksi halus (abu) yang tersebar paling jauh selaras dengan tinggi kolom asap letusan (*eruptive plume*). Dampak langsung sebaran tefra ini terhadap sarana transportasi udara, adalah karena abu letusan yang mengandung unsur silika dapat merusak mesin pesawat udara (korosif). Dalam skala regional terbukti mengganggu kesehatan (pernapasan dan penglihatan), mencemari sumber air dan merusak tanaman, sehingga dapat memicu terjadinya bencana kelaparan. Sedangkan dalam skala global terbukti dapat memicu terjadinya perubahan iklim global (Tambora, 1815 dan Krakatau, 1883).

(2) **Pascaletusan kaldera**, kegiatan vulkanik biasanya diawali oleh tumbuhnya kerucut lava atau skoria pada dasar kaldera. Pada umumnya letusan yang terjadi adalah tipe Stromboli (*magmatik*) atau tipe Maar (*freato-magmatik*) karena posisi dapur magmanya relatif dangkal dengan sistem terbuka, sehingga tidak terjadi akumulasi energi yang besar. Letusan tipe ini pada umumnya menghasilkan lontaran-lontaran bom vulkanik bertekstur skoria (tipe Stromboli) atau bercampur dengan abu dan material klastika lainnya (tipe Maar), yang tersebar dalam radius yang tidak terlalu luas dan membentuk

kerucut skoria atau kerucut sinder (*cinder-cone*). Periode letusan gunung api tipe ini pada umumnya relatif pendek, kurang dari 10 tahun.

Gunung Batur (Bali) yang terletak di dalam kaldera Batur, dapat mewakili tipe gunung api ini. Kegiatannya dicirikan oleh letusan tipe Stromboli yang disertai atau tanpa aliran lava. Erupsi kaldera Batur terjadi lebih dari 20 ribu tahun yang lalu, dan membentuk kaldera berukuran $13,8 \times 10 \text{ km}$, yang ditandai oleh terbentuknya endapan ignimbrit yang bersusunan riodasitan (Bemmelen, 1949; Marinelli & Tazieff, 1968; Wheller & Varne, 1986; Sutawidjaja, 1990; Sutawidjaja, 2000).

Kegiatan akhir gunung api ini terpusat di sekitar kerucut muda. Titik erupsinya berpindah-pindah mengikuti pola rekahan lokal dengan arah timur laut – barat daya. Kegiatan ini berlanjut dan terbatas di dalam kaldera Batur saja, sehingga potensi ancaman bahaya yang ditimbulkan relatif terbatas di dalam kaldera saja.

Dalam pertumbuhan selanjutnya kerucut lava tersebut akan berkembang menjadi gunung api strato (komposit) yang secara bertahap selaras dengan dinamika dan evolusi magmanya (Tabel 2), seperti yang terjadi pada Doro Api Toi (kaldera Tambora), Gunung Barujari (kaldera Rinjani), Gunung Batur (kaldera Batur), Gunung Bromo (kaldera Tenger), dan Gunung Tangkubanparahu (kaldera Sunda) yang telah mengalami evolusi lebih lanjut.

(3) **Lahar** adalah istilah kegunungapian internasional dengan acuan kejadian pada letusan Gunung Kelud tahun 1919. Menurut kejadiannya dibedakan antara *lahar letusan*, yaitu lahar yang terjadi berkaitan langsung dengan letusan gunung api, sedangkan *lahar hujan* adalah lahar yang terjadi akibat dipicu oleh curah hujan yang terjadi di kawasan puncak gunung api (Kemmerling, 1919; Pratomo, 1992). Keberadaan danau kawah merupakan aspek yang berpotensi sebagai ancaman bahaya lahar letusan, sehingga harus diwaspadai karena terjadi bersamaan dengan letusan gunung api tersebut. Jangkauan dan sebaran lahar letusan bergantung pada volume air danau kawah sebelum terjadinya letusan.

Belajar dari kasus yang terjadi pada letusan Gunung Kelud tahun 1919, rekayasa teknik sipil yang dimulai pada tahun 1922 dengan membuat terowongan untuk mengalirkan air danau kawah terbukti berhasil baik, sehingga pada letusan tahun 1951 ($1,8 \text{ juta m}^3$) dan tahun 1990 ($2,5 \text{ juta m}^3$),

tidak terjadi lahar letusan (Tabel 5). Aspek yang perlu diwaspadai untuk tipe gunung api ini adalah keadaan lembah-lembah sungai yang berhubungan langsung dengan kawasan puncak gunung api ini karena berkaitan dengan daya tampung dan dinamika aliran fluida (awan panas letusan dan lahar).

Gunung Kelud dapat mewakili tipe gunung api yang mempunyai kawah terbuka dengan danau kawah, karena tipe ini memiliki ancaman bahaya letusan yang sangat khas, yaitu berpotensi menimbulkan lahar letusan, yang bergantung pada volume danau kawah pada saat terjadinya letusan.

(4) **Kerucut gunung api strato (komposit) dengan atau tanpa kubah lava** umumnya mempunyai pipa kepundan yang relatif panjang, dengan satu atau lebih kantung magma, dan mempunyai ketinggian lebih dari 3000 m di atas permukaan laut. Gunung api tipe ini umumnya mempunyai volume pasokan magma dalam jumlah tertentu, sehingga akan terjadi erupsi secara periodik, selaras dengan volume pasokan magma seperti tersebut di atas.

Gunung Merapi di Jawa Tengah mewakili tipe ini. Letusan tipe Merapi adalah khas, yaitu berkaitan dengan guguran kubah atau lidah lava. Dinamika letusan tipe ini berkaitan dengan laju pasokan (± 1 juta m³/tahun) dan viskositas magma serta bentuk geometri lubang kepundannya, sehingga dapat membangun sistem kubah lava. Gunung api tipe ini mempunyai kawah terbuka (tanpa kubah lava), yang dicerminkan oleh letusan abu secara periodik seperti yang terjadi di Gunung Semeru (Jawa Timur). Mekanisme letusan tersebut di atas dikenal sebagai letusan tipe Merapi yang terkenal menghasilkan "awan panas guguran" yang dalam bahasa lokal disebut "wedus gembel". Aliran piroklastika jenis ini mempunyai beberapa nama yang terkenal, antara lain *nuee ardentes d'avalanche* (Lacroix, 1904), '*Merapi-type glowing clouds*' (Escher, 1933) dan *Merapi-type pyroclastic flow* (Newhall, drr., (2000). Aliran piroklastika jenis ini meluncur melalui lembah-lembah sungai yang mempunyai hulu di kawasan puncak gunung api ini, terkanalisasi dalam lembah sungai, kemudian menyebar pada tekuk lereng (*break-slope*) sungai-sungai tersebut. Demikian juga material hasil letusan abu dan awan panas yang tertumpuk di kawasan puncak gunung api ini berpotensi ancaman bahaya lahar hujan.

Erupsi Gunung Agung tahun 1963, mewakili tipe erupsi gunung api strato komposit yang mempunyai

kawah terbuka. Sebelum letusan paroksismal pertama pada tanggal 17 Maret 1963, telah terbentuk leleran lava, atau dengan perkataan lain bahwa kawah gunung api ini dipenuhi oleh lava.

Letusan paroksismal pertama melontarkan lava yang telah memenuhi kawah gunung api ini, sehingga menghasilkan awan panas letusan (*nuee ardentes d'explosion*) dan awan panas guguran (*nuee ardentes d'avalanches*) dalam jumlah yang signifikan. Letusan paroksismal pertama menyebabkan jatuhnya korban lebih dari 900 jiwa akibat terlanda awan panas ini. Awan panas letusan terbentuk bersamaan dengan terjadinya letusan magmatik atau freatomagmatik, baik sebagai letusan terarah, atau sebagai runtuhannya kolom erupsi. Material awan panas jenis ini terdiri atas bom vulkanik, bongkah lava, lapili, batuapung atau skoria, gas dan abu letusan, yang dihembuskan dan dilontarkan dari dalam lubang kepundan. Sebagian besar komponen pembentukannya berasal dari magma segar (*juvenile*).

Awan panas guguran terjadi karena longsornya (gravitasional) kubah atau lidah lava yang terbentuk beberapa waktu sebelumnya dalam masa erupsi gunung api tersebut. Material awan panas jenis ini umumnya terdiri atas bongkah lava dan fragmen-fragmen yang lebih halus (kecil) yang berasal dari kubah atau lidah lava tersebut di atas dalam berbagai ukuran akibat benturan antar material tersebut.

Letusan paroksismal kedua, yang terjadi dua bulan kemudian, hanya menghasilkan awan panas letusan karena kawah gunung api ini telah terbuka akibat letusan paroksismal pertama.

Letusan paroksismal pertama dan kedua mengakibatkan dasar kawah menjadi lebih rendah (turun) ± 275 m dari keadaan sebelum erupsi 1963.

(5) **Kawah tapal kuda** terbentuk akibat longsornya bagian dari kawah atau tubuh gunung api itu sendiri, baik yang dipicu oleh letusan magmatik (tipe *Bezimyany*, Rusia), letusan nonmagmatik (tipe *Bandai-san*, Jepang) dan yang tidak berkaitan dengan letusan gunung api (tipe *Ontake*, Jepang).

Beberapa kejadian yang berhubungan dengan longsoran bagian tubuh gunung api dipicu oleh letusan magmatik antara lain adalah Gunung Galunggung (4000 tahun yang lalu ?) dan Gunung Merapi (tahun 1006 ?), sedangkan yang dipicu oleh letusan freatik antara lain adalah Gunung Papandayan (1772 dan 2002).

Gunung Papandayan dapat mewakili tipe gunung

api ini, yang mengacu pada mekanisme letusan yang pernah terjadi pada gunung api ini baik pada tahun 1772, maupun tahun 2002. Longsoran bagian tubuh gunungapi yang dipicu oleh gempa bumi dan penyebab lain adalah dinding Kawah Nangklak pada 11 November 2002. Ancaman bencana longsoran tubuh gunung api di Indonesia adalah sangat potensial karena pada umumnya gunung api aktif di Indonesia adalah gunung api strato (berlapis), berbentuk kerucut dan mempunyai ketinggian rata-rata lebih dari 3000 m di atas permukaan laut.

Longsoran tubuh gunung api yang dipicu oleh letusan magmatik terjadi pada Gunung Krakatau tahun 1883, seperti yang diilustrasikan pada gambar 5 (Camus & Vincent, 1984 dan Valentin & Fisher, 2000). Beberapa fenomena seperti tersebut di atas teramati pada sisa kegiatan beberapa gunung api yang lebih tua (sebelum tahun 1600), antara lain adalah Gunung Galunggung (+ 4200 tahun yang lalu), Gunung Merapi (tahun 1006 ?), Gunung Raung, Gunung Guntur tua, Kelud purba, dan lain-lain (Bronto, 1989; 2001; Pratomo, 1992; Bronto & Pratomo, 1996).

Mencermati karakteristik beberapa gunung api aktif di Indonesia saat ini, potensi akan terjadinya fenomena tersebut di atas cukup besar, terutama pada gunung api strato (komposit) yang mempunyai ketinggian lebih dari 3000 m.

(6) Fenomena "pulau gunung api" (*volcano island*) dan "gunung api bawah laut" (*submarine volcano*) memperlihatkan potensi ancaman bahaya letusan yang signifikan, mengacu pada letusan Gunung Krakatau 1883 dan lahirnya Gunung Anak Krakatau pada tahun 1928. Letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883 merupakan salah satu model tsunami yang dipicu oleh letusan sebuah pulau gunung api (Gambar 5). Potensi ancaman bahaya tsunami juga diperlihatkan oleh Gunung Anak Krakatau.

Proses dan mekanisme "lahirnya" Gunung Anak Krakatau yang muncul ke permukaan laut Selat Sunda pada 26 Januari 1928 diawali oleh proses letusan bawah laut tipe *Surtsey*, selama lebih kurang 40 hari, kemudian berkembang menjadi letusan tipe Stromboli yang disertai oleh aliran lava, hingga membentuk daratan seperti keadaan saat ini. Letusan tipe *Surtsey* terjadi akibat interaksi antara magma dan air laut secara proporsional (*hydrovolcanic eruption*) yang memicu terjadinya fragmentasi magma yang menyebabkan terjadinya letusan eksplosif. Letusan

tipe ini menghasilkan lontaran bom skoria disertai pasir dan abu yang bercampur dengan uap air. Dalam kondisi tertentu letusan tipe *Surtsey* dapat memicu terjadinya gelombang tsunami (Gambar 6).

KLASIFIKASI GUNUNG API AKTIF INDONESIA

Berdasarkan kajian karakteristik gunung api tersebut di atas (bangun-tubuh, bentuk kawah, tipe, dan frekuensi letusannya), dan potensi ancaman bahaya letusannya, gunung api aktif Indonesia dapat diklasifikasikan secara sistematis atas delapan tipe (Tabel 6), yaitu tipe-tipe Gunung Tambora (letusan kaldera), Batur (pasca kaldera), Kelud (danau kawah), Papandayan (runtuhan dinding kawah), Merapi (guguran lava pijar), Agung (kawah terbuka), Sangeangapi (leleran lava), dan Gunung Anak Krakatau 1928 (pulau gunung api dan gunung api bawah laut).

Pengelompokan gunung api aktif tipe A dalam delapan tipe tersebut di atas merupakan penelitian yang lebih terinci tentang karakteristik gunung api aktif di Indonesia. Ancaman bahaya letusan gunung api bukan hanya berasal dari gunung api aktif tipe A saja, tetapi justru dari tipe B dan C yang mempunyai potensi ancaman dengan intensitas letusan besar, sebagai contoh Gunung Agung (1963) dan Krakatau (1883) meletus hebat setelah beristirahat lebih dari 100 tahun (Kusumadinata, 1979), dan letusan kaldera Gunung Pinatubo setelah beristirahat selama \pm 700 tahun. Manfaat yang diharapkan dapat dipetik dari tulisan ini adalah untuk mengenal lebih baik dan sistematis tentang karakter gunung api aktif dan potensi ancaman bahaya letusannya.

Masih diperlukan penelitian lebih mendalam untuk mengetahui karakteristik lebih khusus gunung api aktif lainnya (seperti kompleks Gunung Lamongan dengan kawah-kawah *Maar*) untuk menyempurnakan klasifikasi ini, sehingga menjadi lebih bermanfaat untuk mendukung penyelidikan dan mitigasi bencana letusan gunung api.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

- Potensi ancaman bencana gunung api berhubungan erat dengan bangun tubuh gunung api, bentuk kawah dan mekanisme letusannya.

Tabel 6. Tipe Gunung Api Aktif Indonesia dan Beberapa Gunung Api aktif lainnya yang mempunyai Kesamaan Karakteristiknya, dengan Potensi Ancaman Bahaya Letusannya yang spesifik

Karakteristik	Jenis dan tipe letusan (khas) (+)	Ancaman bahaya letusan (++)	Gunung Api
Tambora 1815	Phr-Mag Mag (Plini – ultra Plini)	AF PF SL	Krakatau 1883, Tambora 1815, Kaldera Rinjani, Kaldera Batur, Kaldera Tengger, dll.
Batur	Mag (Stromboli)	AF LF SL	Barujari (Rinjani), Bromo (Tengger), Doroapi (Tambora) Batur (Kaldera Batur), dll.
Papandayan	Phr Phr-Mag (Vulcano) Mag (Bezymiany)	AF VDA PF	Papandayan 1772 dan 2002, Krakatau 1883, Galunggung 4000 BP, dll.
Kelut	Phr Phr-Mag Mag (St. Vincent)	AF PF PL SL	Ijen, Talagabodas, Kawah Putih, Kelud (1919, 1951, 1966, 1990), dll.
Merapi	Mag (Merapi/ Pele)	LD NA/DA SL	Merapi, Semeru, Soputan 2003, Anak Ranakah 1988, dll.
Agung	Phr-Mag Mag (St. Vincent) (Merapi/ Pele)	AF PF PL SL	Agung 1963, Gede, Kerinci
Sangeangapi	Mag (Stromboli)	PF LF	Sangeangapi 1985, Karangetang 1996, Dukono, dll.
Anak Krakatau	Phr-Mag (Surtsey) Mag (Stromboli)	Tsunami (minor) VDA ➔ tsunami	Anak Krakatau 1928, Hobal, Krakatau 1883, dll.

Keterangan:

(+) Phr = Freatik; Phr-Mag = Freatomagmatik; Mag = Magmatik

(++) AF = tepra; PF = Awan panas letusan; LF = Aliran lava; LD = Kubah lava; NA/DA = Guguran awan panas/kubah lava; VDA = Runtuhan tubuh gunung api; PL = Lahar letusan; SL = Lahar hujan

Perubahan karakter letusan gunung api akan mempengaruhi potensi ancaman bencana letusan berikutnya. Letusan raksasa seperti letusan kaldera Tambora (1815) dan Krakatau (1883) pada umumnya akan ditandai oleh perubahan karakter fisik secara mencolok.

- Kawasan gunung api pada umumnya adalah daerah pertanian yang subur dan merupakan

obyek kunjungan wisata alam yang bersifat massal, dan cenderung dipadati oleh manusia, sehingga diperlukan perlindungan khusus terhadap ancaman bahayanya.

- Pendekatan secara sistematis (klasifikasi) berdasarkan karakteristik fisik gunung api (bangun tubuh, bentuk kawah, morfologi puncak) dan mekanisme letusannya dapat dipergunakan un-

tuk memasyarakatkan pengetahuan kegunungapian secara praktis, dalam rangka menunjang penerapan Manajemen Risiko Bencana Letusan Gunung Api.

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu penyusunan makalah ini hingga dapat diterbitkan, terutama Dr. Eddy Mulyadi, Dr. Sutikno Bronto, Samsul Rizal Witiri, dan Dr. Sardjono untuk kesempatan berdiskusi, serta Ir. Igan S. Sutawidjaja, M.Sc. untuk koleksi fotonya. Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada Kepala Pusat Survei Geologi, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi untuk penerbitan makalah ini. Semoga tulisan ini dapat menambah pengetahuan masyarakat tentang kegunungapian dan memberikan kontribusi dalam pelaksanaan *Tupoksi* institusi terkait.

ACUAN

- Abdurachman, E.K., Bourdier, J-L., and Voight, B., 2000. Nuees ardentes of 22 Nov. 1994 at Merapi volcano, Java, Indonesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 100, n. 1-4, h. 345-361.
- Beget, J.E., 2000. Volcanic tsunamis. In: Sigurdsson, H. (ed) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Bemmelen, R.W. van, 1949. *The geology of Indonesia*. Martinus Nijhoff, The Hague, Netherland, 1, 732 h.
- Boudier, J-L., Pratomo, I., Thouret, J-C., Boudon, G., and Vincent, P.M., 1997. Observation, Stratigraphy and eruptive processes of the 1990 eruption of Kelut volcano, Indonesia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 79, h. 181-203.
- Bronto, S. dan Pratomo, I., 1996. Endapan longsoran gunung api dan implikasi bahayanya di kawasan G. Guntur, Kab. Garut, Jawa Barat. *Prosidi PITIAGI 25*, Bandung, 11-12 Des., h. 51-66.
- Bronto, S., 2001. Volcanic Debris Avalanches in Indonesia. *Proc. 3rd ASEGE*, Yogyakarta, h.449-462.
- Camus, G. and Vincent, P.M., 1983. Discussion of a new hypothesis for the Krakatau volcanic eruption in 1883, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 19, h. 167-173.
- Davidson, J. and Da Silva, S., 2000. Composite volcanoes. In: Sigurdsson, H. (ed) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Escher, B.G., 1933. On a classification of central eruption according to gas pressure of the magma and viscosity of the lava; On the character of the Merapi eruption in Central Java. *Overdruk uit Leidsche Geologische Mededeelingen*, VI-1, h. 45-58.
- Hageman, J., 1823. Over elektrische wolken waargenomen bij de uitbarsting van den Papandayan (Java) in Augustus 1772, *Encyclop. Britania*, v.6, p. 218. *Natuurk. Tijdschr. Nederl. Ind.*, 31, h. 478-479.
- Hedervari, P., 1963. On the energy and magnitude of volcanic eruptions. *Bull. Volcanol.* Tome XXI, h. 373-384.
- Jennings, P., 1969. *Disruptions of the environmental balance: The eruptions of Mt. Agung and Mt. Kelut, Indonesia*. MA thesis, Univ. of Hawaii, 158 h. Unpublished.
- Kartadinata, M.N., Budianto, A., Wirakusumah, A.D., and Hadisantono, R.D., 1997. *Pyroclastic flow deposits erupted by the 1815 Tambora; distribution, characteristic of the deposits and interpretation of the 1815 eruption mechanism*. Volcanological Survey of Indonesia. Unpublished report.
- Kemmerling, G. L. L., 1919. Beklimming van den G. Batoeren van den G. Agoeng, de piek van Bali. *Natuurk. Tijdschr. Nederl. Ind.*, 3, h. 66-79.
- Kemmerling, G.L.L., 1931. Beschouwingen over de hemieuwde werking van den Merapi der Vorstenlanden van December 1930. *Koninkl. Nederl. Aardrijksk. Genoot. Tijdschr.*, 48, h. 712-743.
- Kusumadinata, K., 1963. *The eruption of the Agung volcano in Bali, in 1963*. Geological Survey of Indonesia, Bandung. Unpublished report.
- Kusumadinata, K., 1964. The eruption of Agung volcano in Bali, in 1963. *Bull. Geol. Surv. Indon.* 1, no. 1, h. 12-15.
- Kusumadinata, K., 1979. Data Dasar Gunung api Indonesia. *Dit. Vulk.*, Bandung.
- Lipman, P.W., 1997. Subsidence of ash-flow calderas: Relation to caldera size and magma chamber geometry. *Bull. Volcanol.*, 59, h. 198-218
- Leupe, P.A., 1773. *Hollandsche Maatsch. Wetensch te Haarlem*, 4, Verh., h. 21-23.
- Mazot, A. and Bernard, A., 2004. The hydrothermal system of Papandayan volcano and the November 2002 eruption: CO₂ degassing, fluid geochemistry and mineralogy of ejecta. Edisi khusus, Letusan G. Papandayan tahun 2002, *J. Volc. Activity in Indonesia*, 1, no. 5, h. 129-152.
- Mulyadi, E., Abdurahman, O., Hilman, P.M., and Priatna, P., 2006. Mengenal konsep penanganan bencana, bahaya geologi, dan mitigasi bencana geologi di Indonesia. *Warta Geologi*, 1, no. 4, h. 16-48.
- Newhall, C.G. and Dzurisin, D., 1988. Historical unrest caldera at large caldera of the world. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1855.
- Newhall, C.G., Bronto, S., Alloway, B., Banks, N.G., Bahar, I., del Marmol, M.A., Hadisantono R.D., Holcomb, R.T., McGeehin, J., Miksic, J.N., Rubin, M., Sayudi, S.D., Sukhyar, R., Andreastuti, S., Tilling, R.I., Torley, R., Trimble, D., and Wirakusumah, A.D., 2000. 10,000 years of explosive eruptions of Merapi volcano, Central Java: Archeological and modern implications. *J. Volcanol, Geotherm. Res.* 100, no. 1-4, h. 9-50.
- Pratomo, I., Surono, Bourdier, J-L., Lesage, P., Vandemeulebrouck, J., Vincent, P.M., 1991. L'eruption du volcan Kelut (Java Est, Indonesie) du fevrier 1990. Analyse preliminaire des observations geologiques et geophysiques. *Rapport quadriennal 1987-1990, C.N.F.G.G., XX^{em} A.G. U.G.G.I.*, Vienne, h. 87-95.
- Pratomo, I., 1992. *Etude de l'eruption de 1990 du volcan*

- Kelut (Java Est, Indonésie): son apport a l'interpretation de l'activite historique du volcan.* These Doctorat, Univ. Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France. Unpublished.
- Pratomo, I., 2004. Erupsi G. Papandayan 2002; Sekuen erupsi dan karakter fisik produk letusannya. Edisi khusus, Letusan G. Papandayan tahun 2002, *J. Volc. Activity in Indonesia.*, 1, no. 5, h. 10-17.
- Pratomo, I., 2006. Hazards potential of the sector failures of Indonesian active-volcanoes edifices (in prep.)
- Pratomo, I. and Abdurachman, K., 2004. Characteristics of the Indonesian active volcanoes and their hazards. *Mineral & Energi*, 2, no. 4, h. 56-60.
- Purbawinata, M.A., Wirakusumah, A.D., and Pratomo, I., 2004. Directed blast and debris avalanches of 2002 Papandayan eruption, West Java - Indonesia. Edisi khusus, Letusan G. Papandayan tahun 2002, *J. Volc. Activity in Indonesia*, 1, no. 5, h. 103-114.
- Rittmann, A., 1960. *Volcanoes and their activity*. John Willey & Sons, Inc. New York – London – Sydney, 395 h.
- Self, S., Rampino, M., Newton, M., and Wolff, J., 1984. Volcanological study of the great Tambora eruption of 1815. *Geology*, 12, h. 659-663.
- Sigurdsson, H. and Carey, S., 1989. Plinian and co-ignimbrite tephra fall from the 1815 eruption of Tambora volcano. *Bull. Vulcanol.*, 51, h. 243-270.
- Simkin T. and Fiske R.S., 1983. "*Krakatau 1883: The volcanic eruption and its effects.*" Smithsonian Institution Press, Washington D.C.
- Stehn, Ch. E., 1929. The Geology and Volcanism of the Krakatau Group. *Proc. 4th Pac. Sci. Cong.*, (Batavia), p. 1-55.
- Stothers, R.B., 1984. The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science*, 224, h. 1191-1198.
- Surjo, I., 1965. Casualties of the latest activity of the Agung volcano. *Geol. Survey Indon. Bull.*, 2, n. 1, h. 22-26.
- Sutawidjaja, I.S., 1990. *Evolution of Batur Caldera, Bali, Indonesia*. M.Sc. Thesis, Victoria Univ. of Wellington, New Zealand.
- Sutawidjaja, I.S., 2000. A guide to the geological phenomena of Batur Caldera, Bali - Indonesia. *I.A.V.C.E.I General Assembly 2000*, 18-22 July, 2000. Bali, Indonesia.
- Sutawidjaja, I.S., Sigurdsson, H., Rachmat, H., and Pratomo, I., 2005. The Deadliest Volcanic Eruption of 1815 Tambora Volcano, Sumbawa, Indonesia. *Proc. Int. Semin. On Quart. Geol.*
- Takada, A., Yamamoto, T., Kartadinata, N., Budiarto, A., Munandar, A., Matsumoto, A., Suto, S., and Venuti, M.C., 2000. Eruptive history and magma plumbing system of Tambora volcano, Indonesia. *Res. Volc. Hazr. Assess in Asia*, ITIT Japan, h. 42-79.
- Taverne, N.J.M., 1925. Merkwaardige uitbarstingen van de Papandayan. *Gedenboek*, n. 4105, h. 481-519.
- Valentine, G.A. and Fisher, R.V., 2000. Pyroclastic surges and blasts. In: H. Sigurdsson, (ed) *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press.
- Van Padang, N., 1951. *Catalogue of volcanic activity and solfatara fields*.
- Wheller, G.E. and Varne, R., 1986. Genesis of dacitic magmatism at Batur volcano, Bali, Indonesia: Implications for the origin of stratovolcano calderas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 28, h. 363-378
- Wirakusumah, A.D., 1982. Perbukitan Sepuluhribu di Tasikmalaya. *Berita Geologi*, 14, no. 23, h. 211-216.
- Zen, M.T., 1964. The Volcanic Calamity in Bali, in 1963. *Tijdsch. Konink. Nederl. Aard. Genootschap.*, 91, no. 1, h. 92-100
- Zen, M.T. and Hadikusumo, D., 1964. Preliminary Report on the 1963 eruption of Mt. Agung in Bali (Indonesia). *Bull. Volcanologique*, 27, h. 1-31.
- Zollinger, H., 1845. Een uitstapje naar het eiland Bali. *Ned. Ind. Tijdschr.* 7, n. 4., h. 43.