

Bab IV

VOG | Volcano Smog Menelisis Ancaman Abu Vulkanis terhadap Kesehatan Manusia dan Lingkungan

Saipul Hamdi dan Wiwik Setyawati

Vog berasal dari kata *volcano* dan *smog*. *Vog* adalah kabut vulkanis yang terbentuk saat sulfur dioksida (SO₂) dan beberapa jenis gas serta partikulat yang dihasilkan dari aktivitas gunung berapi bereaksi dengan uap air dan oksigen dengan bantuan sinar matahari.

Kabut vulkanis mengandung asam sulfat dan senyawa sulfat lainnya. Diketahui bahwa senyawa asam sulfat ataupun senyawa sulfat lainnya bersifat korosif dan mengganggu keseimbangan lingkungan dan biota air. Dalam jumlah yang banyak, senyawa sulfat menyebabkan fenomena hujan asam yang mengganggu

S. Hamdi & W. Setyawati

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: saip001@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Hamdi, S. & Setyawati, W. (2026). VOG | Vulcano Fog Menelisis ancaman abu vulkanis terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (55–74). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1808
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

produktivitas padi dan palawija. Tanaman yang terkena hujan asam tersebut akan menjadi layu, kering, dan akhirnya mati. Jika terjadi dalam skala besar, tentu saja hal ini akan mengganggu ketahanan pangan nasional. Namun demikian, fenomena hujan asam tidak hanya disebabkan oleh debu vulkanis erupsi gunung berapi, tetapi juga disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan sehingga alam tidak memiliki kemampuan yang cukup untuk menetralkan kandungan asam di atmosfer.

Debu vulkanis merupakan gabungan dari beberapa partikel dan gas yang dapat berdampak buruk bagi manusia karena mengandung beberapa senyawa berbahaya, misalnya karbon dioksida, sulfurdioksida, hydrochloric acid, dan *hydrofluoric acid*. Erupsi gunung api selain menghasilkan debu vulkanis juga mengeluarkan bebatuan dalam berbagai ukuran. Meskipun dapat meningkatkan kesuburan tanah karena banyak mengandung mineral dan unsur-unsur penyubur tanah, debu vulkanis juga mengandung beberapa jenis bahan berbahaya terutama yang bersifat logam, seperti arsenik, antimon, kadmium, kobalt, kromium, dan merkuri. Batuan vulkanis dapat berupa padatan ataupun cairan yang dikenal dengan nama lava, dan lava dapat bersifat panas maupun dingin. Proses pengeluaran batuan vulkanis dari dalam perut bumi berlangsung relatif singkat namun dapat menghasilkan dampak yang luas.. Oleh karena itu, pembahasan debu vulkanis atau *vog* tidak lepas dari aktivitas gunung api yang berjajar menyusun *ring of fire*, terutama ketika terjadi letusan yang dahsyat.

A. *Ring Of Fire*

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki risiko bencana vulkanik tertinggi di dunia karena letak geografisnya yang berada di sepanjang jalur *Pacific Ring of Fire* (Cincin Api Pasifik). Di dalam sirkum ini, Indonesia memiliki sedikitnya 127 gunung berapi aktif, di mana 69 di antaranya dipantau secara intensif dan real-time selama 24 jam oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) melalui sistem *Multiplatform Application for Geohazard Mitigation and Assessment* (MAGMA) Indonesia (PVMBG, 2026).

Ring of fire Indonesia terbentang dari Pulau Sumatra, Jawa, Sulawesi, Nusa Tenggara hingga Maluku, dan luas ancaman erupsinya mencapai 16.670 km² (Annisha, 2017). Erupsi yang dahsyat tentu saja akan melepaskan banyak senyawa sulfur ke udara permukaan, bahkan dapat mencapai lapisan troposfer atas maupun stratosfer. Erupsinya akan berpotensi meningkatkan jumlah *vog* di udara, baik dalam skala lokal maupun global.

Beberapa gunung berapi aktif di dalam *ring of fire* dunia yang tercatat karena letusannya yang sangat dahsyat di antaranya adalah letusan Gunung Tambora (1815), Gunung Krakatau (1883), Gunung Novarupta (1912), Gunung Saint Helens (1980), Gunung Nevado del Ruiz (1985), dan Gunung Pinatubo (1991). Selain letusan yang dahsyat, gempa bumi hebat juga sering terjadi di dalam *ring of fire* di antaranya adalah gempa Chili (1960), gempa Alaska (1964), gempa Chili (2010), gempa Jepang (2011), serta gempa yang memicu tsunami Samudra Hindia (2004).

Selain erupsi gunung berapi, keberadaan Indonesia di dalam *ring of fire* menyimpan potensi energi panas bumi yang cukup besar dan dapat dimanfaatkan sebagai energi terbarukan menggantikan energi bahan bakar fosil yang jumlahnya makin berkurang (Nurwahyudin & Harmoko, 2020). Hingga tahun 2014, pemanfaatan energi panas bumi hanya 248 MW atau sekitar 1,15% dari jumlah potensi energi panas bumi yang tersedia di Indonesia (Hakim et al., 2023).

Jumlah total potensi energi panas bumi yang tersedia di Indonesia diperkirakan sebesar 23,7 GW atau 40% dari cadangan panas bumi dunia. Pada tahun 2017 telah teridentifikasi 331 titik potensi panas bumi yang tersebar di 30 provinsi, atau membentang dari Pulau Sumatra, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku, hingga Papua. Potensi energi panas bumi terbesar tersedia di Pulau Sumatra (13.516 MW) dan potensi energi panas bumi terkecil tersedia di Papua (75 MW) (Fandari et al., 2014). Hingga tahun 2021, jumlah pembangkit listrik tenaga panas bumi yang telah beroperasi di Indonesia adalah sejumlah 17 PLTP.



Sumber: U.S. Geological Survey (2016)

Gambar 4.1 Sebaran Gunung Api di Indonesia (Ring of Fire)

Beberapa erupsi gunung berapi di Indonesia yang tercatat di dalam sejarah adalah sebagai berikut.

- 1) Gunung Merapi (Yogyakarta): terjadi erupsi pada tahun 2023, 2020, 2010 dan beberapa erupsi lainnya. Gunung Merapi termasuk gunung berapi aktif yang memiliki siklus erupsi bulanan hingga 2–5 tahunan. Sejak tahun 1548, Gunung Merapi telah melakukan erupsi sebanyak 68 kali. Erupsi Gunung Merapi umumnya disertai dengan awan panas yang disebut oleh masyarakat setempat sebagai *wedhus gembel*. Selain suhu yang tinggi dan mencapai 500–600 °C di permukaan bumi, awan panas juga mengandung gas fluor, belerang, gas asam (H_2S), magnesium, dan kalium yang bersifat racun.
- 2) Gunung Galunggung (Jawa Barat): terjadi erupsi pada tahun 1982–1983, 1918, 1894, dan 1822. Pada erupsi tahun 1982, erupsi Gunung Galunggung mengeluarkan asap hitam bergumpal-gumpal membumbung hingga ketinggian 8 km disertai semburan benda pijar setinggi 50–100 m. Hujan abu, batu, dan pasir, serta lahar mengakibatkan kerusakan infrastruktur dan permukiman masyarakat di sekitarnya.

- 3) Gunung Agung (Bali): terjadi erupsi pada tahun 1808, 1821, 1843, 1963, dan 2018 (Indra, 2018). Abu panas dan gas melambung hingga mencapai ketinggian 10 km. Ketinggian kolom erupsi pada erupsi tahun 2018 adalah 2.000–2.500 m di atas puncak kawah, disertai dengan asap dan abu vulkanis berwarna kelabu.

Masih ada banyak erupsi kecil gunung berapi di Indonesia, namun tidak menimbulkan dampak serius jangka panjang, baik bagi masyarakat sekitar maupun skala global.

B. Beberapa Erupsi Gunung Berapi yang Sangat Dahsyat

Di dalam subab ini akan dibahas lima gunung berapi dahsyat yang erupsinya menghasilkan senyawa sulfur dalam jumlah yang sangat banyak ke lapisan stratosfer. Tidak semua erupsi gunung berapi tercatat di dalam sejarah secara baik, karena sangat bergantung pada kemajuan teknologi pada saat tersebut.

1. Gunung Tambora, Indonesia (1815)

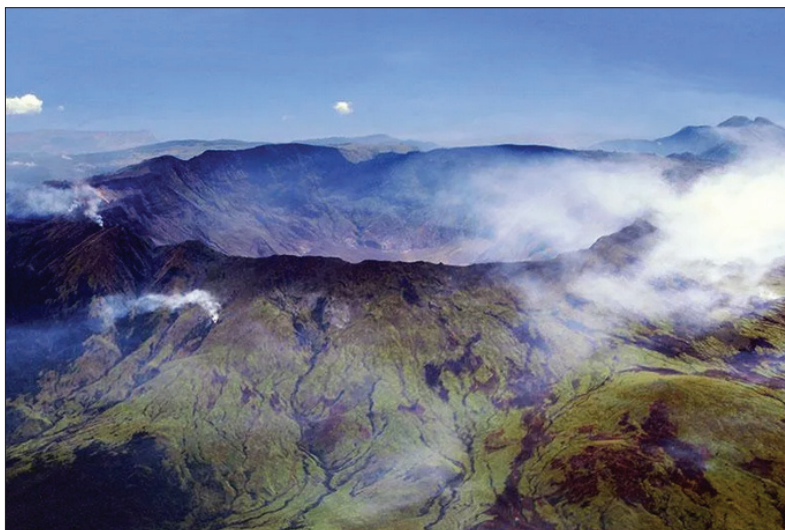
Gunung Tambora atau Tãmboro terletak di Pulau Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, Indonesia, dan merupakan salah satu gunung tertinggi di Indonesia pada masa lalu. Ketinggiannya pada masa lalu mencapai 4.300 m (Stothers, 1984) dan erupsi pada tahun 1815 dengan kekuatan 7 VEI (*Volcanic Explosivity Index*).

Erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815 dilaporkan telah menyebabkan lebih dari 71.000 jiwa kehilangan nyawanya di Sumbawa dan Lombok akibat dampak langsung maupun kelaparan yang terjadi setelahnya, menjadikannya sebagai erupsi gunung berapi paling mematikan dalam sejarah modern (Oppenheimer, 2003). . Erupsi yang dahsyat tersebut menghasilkan dentuman suara yang terdengar hingga Kepulauan Maluku, Batavia, hingga Sumatra Selatan.

Hujan abu tebal menutupi banyak pulau yang jauh dari lokasi erupsi. Semua tumbuhan di pulau hancur. Pohon yang tumbang

bercampur dengan abu batu apung masuk ke laut dan membentuk rakit dengan jarak lintas melebihi 5 km (Stothers, 1984). Akibat letusan yang dahsyat ketinggian Gunung Tambora saat ini adalah 2.851 m, dan letusan terakhir yang tercatat terjadi pada tahun 1967 tidak disertai dengan ledakan/gempa (VEI = 0).

Gunung Tambora mengeluarkan sekitar 50 km³ lahar pada letusan besarnya (Sparks et al., 2005) dan ribuan ton debu yang membumbung hingga ketinggian 42 km. Sejumlah 18–180 km³ material vulkanis juga dilepaskan pada letusan selama tiga malam (Geria, 2015).



Sumber: Global Volcanism Program (2024)

Gambar 4.2 Erupsi Gunung Tambora pada tahun 1815 menghasilkan kaldera yang sangat besar

Abu vulkanis yang dihasilkan pada erupsi Gunung Tambora mencapai lapisan stratosfer hingga ketinggian 43 km (Oppenheimer, 2003), dan senyawa sulfur yang diinjeksikan tersebut menyebabkan penyimpangan/anomali iklim global. Dengan

menggunakan beberapa metode perhitungan, jumlah sulfur yang dilepaskan ke lapisan stratosfer berkisar 10–20 Tg S (Oppenheimer, 2003). Senyawa sulfur kemudian tersebar di lapisan stratosfer hingga mencapai jarak ribuan km dalam tenggang waktu selama beberapa tahun dan memberikan dampak selama bertahun-tahun.

2. Gunung Krakatau, Indonesia (1883)

Gunung Krakatau yang erupsi pada tahun 1883 dengan skala 6 VEI, setara dengan 30.000 bom atom seperti yang digunakan pada Perang Dunia II. Erupsi menghasilkan tsunami setinggi 40 meter yang sangat kuat, hingga mampu menghempaskan sebuah bongkahan batu karang raksasa seberat 600 ton dari laut ke pesisir daratan Anyer (Simkin & Fiske, 1983). Selain memicu gelombang tsunami dahsyat tersebut, erupsi Gunung Krakatau juga menyemburkan awan panas serta melontarkan jutaan ton material vulkanik ke atmosfer, dengan suara letusan yang terdengar sampai ke Afrika yang jaraknya sekitar 4.650 km.

Erupsi dahsyat Gunung Krakatau pada tahun 1883 menyemburkan material vulkanik dan gas sulfur dalam jumlah sangat besar hingga mencapai lapisan stratosfer. Kolom erupsi diperkirakan menjulang hingga puluhan kilometer di atas permukaan bumi, sementara abu vulkanik dan aerosol sulfat kemudian tersebar secara global mengikuti sirkulasi atmosfer (Robock, 2000; Self & Rampino, 1981). Sebaran aerosol tersebut mengurangi intensitas radiasi Matahari yang mencapai permukaan Bumi sehingga menyebabkan pendinginan global sekitar 0,51,2°C selama beberapa tahun setelah erupsi serta memengaruhi kondisi iklim di berbagai belahan dunia (Robock, 2000). Selain itu, hujan yang membawa abu vulkanik di beberapa wilayah sekitar gunung turut menurunkan kualitas air sehingga tidak layak dikonsumsi tanpa pengolahan terlebih dahulu.

Jumlah korban jiwa akibat erupsi Gunung Krakatau diperkirakan mencapai sekitar 36.000 orang, meskipun beberapa publikasi mengemukakan bahwa jumlah sebenarnya kemungkinan lebih tinggi karena banyak korban tidak terdokumentasikan secara resmi (Global

Volcanism Program, 2024; Simkin & Fiske, 1983). Wilayah pesisir di sekitar Selat Sunda mengalami kerusakan paling parah, terutama akibat tsunami besar yang dipicu oleh runtuhnya tubuh gunung dan aktivitas vulkanik selama erupsi tersebut.



Sumber: U.S. Geological Survey, 1999 dimodifikasi dari Simkin dan Fiske (1983)

Gambar 4.3 Perubahan morfologi Kepulauan Krakatau akibat erupsi tahun 1883 dan kemunculan Gunung Anak Krakatau sejak tahun 1927.

3. Gunung Mont Pelée, Karibia (1902)

Gunung Mont Pelée yang memiliki ketinggian sekitar 1.397 m mengalami erupsi besar pada 8 Mei 1902. Erupsi tersebut menghancurkan Kota Saint-Pierre, yang pada masa itu dikenal sebagai Paris of

the Caribbean karena perkembangan ekonomi dan budayanya. Kota tersebut luluh lantak akibat terjangan awan panas (*pyroclastic flow* atau *nuée ardente*) yang bergerak sangat cepat dengan suhu tinggi, sehingga menewaskan sekitar 30.000 penduduk hanya dalam waktu singkat (Global Volcanism Program, n.d.; Lacroix, 1904).



Sumber: Rosen (2015)

Gambar 4.4 Perbandingan Kondisi Kota Saint-Pierre Sebelum dan Sesudah Erupsi Gunung Mont Peleé di Pulau Martinique, Karibia, pada Tahun 1902

Aktivitas vulkanik telah diawali oleh hujan abu sejak awal Mei 1902 dan diikuti oleh peningkatan intensitas erupsi pada hari-hari berikutnya. Endapan abu vulkanik yang tebal menyebabkan jarak pandang menurun drastis, bahkan menimbulkan kondisi gelap pada siang hari di sekitar Saint-Pierre. Tipe letusan Gunung Mont Pelée kemudian menjadi acuan dalam klasifikasi vulkanologi dan dikenal sebagai letusan Peléan (*Peléan eruption*) karena didominasi oleh pembentukan kubah lava yang diikuti runtuhnya serta aliran piroklastik yang sangat destruktif.

Pada puncak erupsi tanggal 8 Mei 1902, kolom erupsi dan awan piroklastik berkembang sangat cepat sehingga menutupi langit di

wilayah sekitar gunung. Abu vulkanik tersebar mengikuti arah angin ke berbagai wilayah di sekitar Pulau Martinique, sementara partikel yang lebih halus memasuki atmosfer atas dan dapat terbawa hingga jarak yang jauh (Lacroix, 1904; Sigurdsson et al., 2015).

4. Gunung Nevado del Ruiz, Kolombia (1985)

Gunung Nevado del Ruiz memiliki ketinggian sekitar 5.321 m di atas permukaan laut dan terletak sekitar 130 km di sebelah barat Bogotá, Kolombia. Gunung berapi yang puncaknya tertutup gletser ini meletus pada 13 November 1985 dengan magnitudo erupsi sebesar Volcanic Explosivity Index (VEI) 3 (Global Volcanism Program, 2024).

Meskipun skala erupsinya tergolong sedang, panas yang dihasilkan mampu mencairkan sebagian lapisan es dan salju di puncak gunung sehingga membentuk lahar vulkanik yang mengalir deras mengikuti lembah-lembah sungai. Lahar tersebut menghancurkan hampir seluruh Kota Armero dan menewaskan sekitar 25.000 penduduk. Di Kota Chinchiná, lahar dan aliran debris juga menyebabkan sekitar 1.900 korban jiwa (Global Volcanism Program, 2024; Pierson et al., 1990).

5. Gunung Unzen, Jepang (1792)

Gunung Unzen terletak di Semenanjung Shimabara, Prefektur Nagasaki, Jepang. Gunung ini mengalami erupsi besar pada tahun 1792 yang memicu longsor lereng ke arah Laut Ariake sehingga menghasilkan tsunami dengan tinggi gelombang mencapai sekitar 57 m. Bencana tersebut menewaskan sekitar 15.000 orang dan dikenal sebagai bencana vulkanik paling mematikan dalam sejarah Jepang (Global Volcanism Program 2024). Volume lava yang dihasilkan pada erupsi tahun 1792 diperkirakan mencapai sekitar 20 juta m³, sedangkan volume abu vulkanik yang terlontar ke atmosfer tidak terdokumentasikan secara pasti. Hampir dua abad kemudian, Gunung Unzen kembali aktif pada tahun 1990. Selama periode erupsi 1991–1995 terjadi pertumbuhan kubah lava yang disertai runtuhnya kubah berulang sehingga menghasilkan aliran piroklastik dengan

total volume mencapai ratusan juta meter kubik. Salah satu awan panas yang terjadi pada 3 Juni 1991 menewaskan 43 orang, termasuk para ilmuwan dan jurnalis yang sedang melakukan pengamatan di sekitar gunung (Yamamoto et al., 1993).

C. Dampak *Vog* Terhadap Kesehatan

Sebagai bagian dari polusi udara yang berupa kombinasi dari gas vulkanis dan partikel asap, *vog* memberikan dampak yang tidak sehat terhadap manusia dan lingkungan sekitar. Partikel-partikel halus di dalam *vog* akan mengganggu sistem pernapasan seperti batuk dan sesak napas. Iritasi mata dan kulit, sakit kepala dan kelelahan merupakan dampak lain apabila terpapar *vog* dalam jumlah yang banyak. Bahkan, paparan *vog* dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan, kanker, dan kardiovaskuler. Mueller et al. (2020) melaporkan beberapa dampak abu vulkanis terhadap kesehatan manusia dari beberapa letusan gunung berapi di seluruh dunia. Dampak yang paling umum dan terjadi secara langsung adalah terkait dengan pernapasan, terutama untuk wilayah yang dekat dengan sumber letusan.

Vog berdampak pada kesehatan, terutama terhadap orang-orang yang memiliki masalah dengan sistem pernapasannya. Salah satu senyawa yang terkandung dalam *vog* adalah sulfur dioksida (SO_2), yang tidak berwarna, tetapi memiliki bau yang khas, dan bersifat mengganggu.

Pada umumnya, senyawa gas ini akan mulai terasakan pada konsentrasi 0,3–1,4 ppm dan mudah terlihat pada 3 ppm (Wellburn, 1994). Senyawa ini bersifat stabil dan memiliki bobot 2 kali lebih berat daripada udara (Lide, 2003) serta sangat larut di dalam air (Gangolli, 1999).

Senyawa SO_2 yang terkandung di dalam *vog* dapat menyebabkan sakit perut dan mual, serta berpotensi menyebabkan kerusakan pada saluran pernapasan dan paru-paru. Bahkan, SO_2 dapat secara cepat menyebabkan ketidaksadaran pada konsentrasi lebih dari 100 ppm, dan berpotensi menyebabkan kematian. Sementara itu, pada

kosentrasi yang rendah (2–5 ppm) sulfur dioksida yang terkandung di dalam *vog* dapat menyebabkan iritasi pada kulit, mata, hidung, bahkan tenggorokan. Selain gejala-gejala tersebut, *vog* juga dapat menyebabkan gangguan kesehatan berupa sakit kepala, gangguan pernapasan, mata berair, sakit tenggorokan, rasa lelah, dan gejala flu seperti demam, dan sebagainya.

Sementara itu, H_2S yang juga terkandung di dalam *vog* pada konsentrasi lebih dari 100 ppm dapat menyebabkan kelelahan indra penciuman. Bahkan, pada konsentrasi yang sangat tinggi (lebih dari 500 ppm), gas ini dapat menyebabkan ketidaksadaran ataupun kematian dalam hitungan menit.

Sebagian orang akan langsung bereaksi pada konsentrasi H_2S yang rendah (2–5 ppm) berupa iritasi pada mata, sakit kepala, mual, dan masalah pernapasan pada penderita asma. Gas H_2S merupakan senyawa gas yang tidak berwarna, tetapi berbau seperti telur busuk. Pada konsentrasi 4–46% volume (Sax & Lewis, 1991), gas ini relatif mudah terbakar dan menghasilkan api dengan warna biru-pucat.

Tabel 4.1 Dampak Paparan H_2S terhadap Kesehatan

Batas Paparan (ppm)	Efek Kesehatan
0,00011–0,00033	Konsentrasi latar belakang yang paling umum.
0,01–1,5	Ambang batas mulai tercium seperti bau telur busuk.
2–5	Paparan yang terlalu lama dapat menyebabkan mual, mata berair, sakit kepala, atau kurang tidur. Masalah saluran napas (penyempitan bronkus) pada beberapa pasien asma.
20	Mengalami rasa lelah, kehilangan nafsu makan, sakit kepala, mudah tersinggung, daya ingat buruk, dan merasa pusing.
50–100	Mengalami konjungtivitis ringan (“mata gas”) dan iritasi saluran pernapasan setelah 1 jam. Dapat menyebabkan gangguan pencernaan dan kehilangan nafsu makan.

100	Batuk-batuk, iritasi mata, kehilangan penciuman setelah 2–15 menit (kelelahan penciuman). Perubahan ritme pernapasan, mengantuk setelah 1–30 menit. Iritasi tenggorokan setelah 1 jam. Peningkatan keparahan gejala secara bertahap selama beberapa jam. Kematian dapat terjadi setelah 48 jam.
100–150	Kehilangan daya penciuman (kelelahan penciuman atau kelumpuhan).
200–300	Konjungtivitis yang nyata dan iritasi saluran pernapasan setelah 1 jam. Edema paru dapat terjadi akibat paparan yang terlalu lama.
500–700	Limbung bahkan ambruk dalam 5 menit. Kerusakan serius pada mata dalam 30 menit dan dapat menyebabkan kematian dalam 30–60 menit.
700–1000	Pingsan dalam 1–2 tarikan napas, henti napas, bahkan kematian dalam beberapa menit.
1000–2000	Kematian dalam waktu yang sangat cepat.

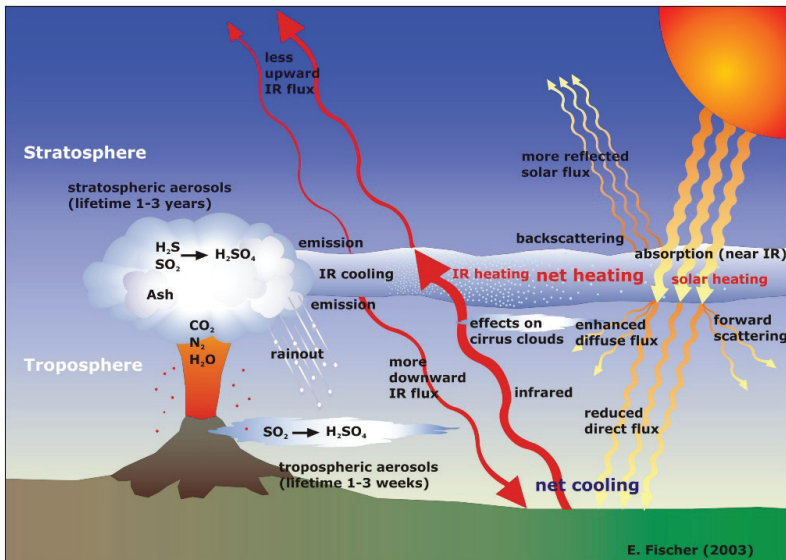
Catatan. Diadaptasi dari Occupational Safety and Health Administration (n.d.).

D. Dampak Vog Terhadap Lingkungan

Dampak utama *vog* terhadap lingkungan adalah menyebabkan hujan asam serta menghalangi sinar matahari mencapai permukaan bumi. Gunung Tambora yang meletus pada tahun 1815 dan menghasilkan debu vulkanis yang mencapai lapisan stratosfer telah menyebabkan terhalangnya sinar matahari mencapai permukaan bumi sehingga bumi menjadi gelap gulita cukup lama dalam kurun waktu satu tahun setelah letusan. Akibat erupsi tersebut, tahun 1816 dinyatakan sebagai *year without a summer* yang menyebabkan terjadinya bencana di banyak belahan dunia. Di dalam skala global, terjadi penurunan suhu sebesar 0,4–0,7°C (Stothers, 1984).

Sementara itu, letusan Gunung Pinatubo pada tahun 1991 telah menyebabkan pendinginan global sebesar 0,28°C selama 13 bulan sejak letusan (Boretti, 2024). Penurunan suhu bumi secara global menyebabkan bencana besar karena terjadinya perubahan iklim secara global. Kesulitan bahan pangan disebabkan banyaknya pertanian dan perkebunan yang gagal panen, serta hewan-hewan

ternak yang tidak dipersiapkan untuk menghadapi penurunan suhu lingkungan dalam jangka waktu yang lebih panjang dari biasanya.



Sumber: Fischer (2004)

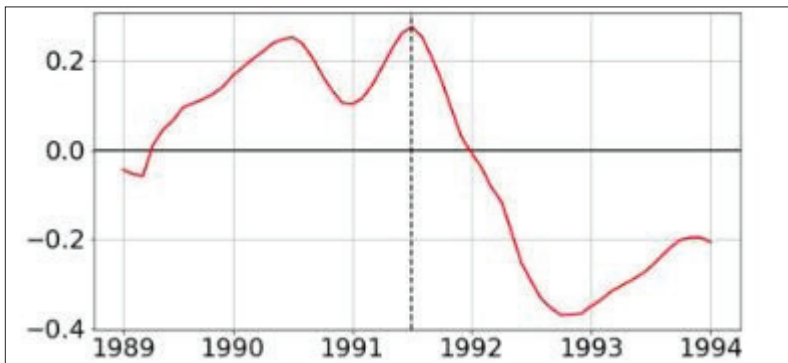
Gambar 4.5 Skenario erupsi gunung berapi memengaruhi iklim, dalam jangka panjang menimbulkan efek pendinginan global atau *global cooling*.

Setahun setelah terjadinya erupsi Gunung Krakatau, suhu rata-rata musim panas di belahan bumi utara turun sebesar 4°C (Bradley & Raymond, 1988). Erupsi Gunung Krakatau yang mendorong sejumlah besar gas SO₂ ke dalam lapisan stratosfer kemudian menyebar ke seantero bumi. Hal ini menyebabkan konsentrasi asam sulfat di dalam awan cirrus meningkat secara tajam yang berdampak pada meningkatnya albedo awan. Meningkatnya albedo awan berdampak pada lebih banyaknya energi matahari yang dipantulkan kembali ke luar angkasa sehingga menimbulkan gejala *global cooling*.

Setelah terjadinya erupsi vulkanis dahsyat antara tahun 1883 dan 1992, tercatat terjadinya pemanasan global di wilayah Eurasia

dan Amerika Utara. Sementara itu, di wilayah Timur Tengah dan Afrika utara terjadi pendinginan global (Robock & Mao, 1992).

Erupsi Gunung Pinatubo (1991) di Filipina memuntahkan sejumlah 15–19 Mt SO_2 ke atmosfer (Gerlach et al., 1996), jumlah ini jauh lebih banyak dibandingkan dengan 7 Mt SO_2 yang dilepaskan oleh erupsi Gunung El Chichón di Meksiko pada tahun 1982. Erupsi Gunung Pinatubo juga memberikan dampak penurunan suhu bumi, termasuk di wilayah Indonesia (benua maritim) sebesar $0,4^\circ\text{C}$ pada kurun waktu satu tahun setelah terjadinya erupsi. Penurunan suhu dekat permukaan dapat dikaitkan dengan pengurangan anomali energi netto matahari pada periode yang diamati. Dampak anomali suhu bumi masih terasa hingga tiga tahun setelah erupsi Gunung Pinatubo.



Diadaptasi dari Salsabila et al. (2022)

Gambar 4.6 Deret waktu rata-rata anomali suhu udara dekat permukaan di wilayah benua maritim. Garis putus-putus vertikal adalah saat terjadinya erupsi Gunung Pinatubo.

Asam sulfat di dalam *vog* dapat terperangkap di dalam butiran-butiran awan, dan jika turun sebagai hujan dapat menyebabkan hujan asam. Hujan asam merupakan hujan yang memiliki pH kurang dari 5,6 dan bersifat asam dan korosif. Secara alami, hujan memiliki pH sedikit di bawah 6 karena senyawa karbon dioksida yang terlarut di dalam air hujan memiliki bentuk sebagai asam lemah. Namun

demikian, jenis asam ini berfungsi dalam membantu melarutkan mineral dalam tanah yang diperlukan oleh tumbuh-tumbuhan.

Adanya senyawa sulfur di udara akan mengotori air hujan dengan cara bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan nitrogen oksida, kemudian membentuk asam sulfat dan asam nitrat dan jatuh bersama air hujan. Air hujan yang bersifat asam akan menyirami tanaman dan permukaan bumi, kemudian meresap ke dalam tanah, dan menimbulkan dampak yang tidak baik bagi lingkungan. Air hujan yang bersifat asam dapat mengikis jaringan pada tumbuhan sehingga mengurangi kemampuan tumbuhan dalam melakukan fotosintesis, tumbuhan mudah mengalami kekeringan, dan rentan terhadap hama penyakit dan serangga.

Setelah meresap ke dalam tanah, air hujan yang bersifat asam akan melarutkan nutrisi dan mineral yang bermanfaat bagi tumbuhan kemudian menyapunya sehingga tidak sempat diserap oleh tumbuhan. Di lingkungan perairan, misalnya danau dan rawa-rawa, air hujan yang bersifat asam dapat merusak insang ikan, menyebabkan embrio menjadi mati, bahkan menyebabkan ikan-ikan menjadi mandul (steril) karena sangat kekurangan kalsium. Akibatnya, ekosistem perairan menjadi terganggu.

Tabel 4.2 Perbandingan Erupsi Beberapa Gunung Berapi

Letusan	Tahun	Tinggi asap (km)	Volcano Eruption Index	Perubahan musim panas belahan bumi utara °C
Tambora	1815	43	7	-0,5
Krakatau	1883	25	6	-0,3
Katmai	1912	32	6	-0,4
Pinatubo	1991	34	6	-0,5
Nevada del Ruiz	1985	27	3	Tidak terdapat perubahan

Catatan. Data diadaptasi dari Oppenheimer (2003) dan Global Volcanism Program (2024).

Vog atau kabut vulkanis yang terbentuk dari letusan gunung berapi merupakan percampuran antara abu vulkanis dan *smog*, dan

pada umumnya mengandung unsur sulfur atau belerang. Sulfur bersifat multivalensi dan dapat teroksidasi menjadi senyawa sulfat dan sulfit. Senyawa ini dapat mengiritasi kulit dan jaringan selaput lendir mata, tenggorokan, dan hidung sehingga menyebabkan gangguan pernapasan berupa batuk, sesak napas, bahkan asma. Dalam jangka waktu yang agak lama, *vog* yang masuk ke dalam tubuh juga menyebabkan sakit kepala dan kelelahan. Dalam paparan yang lebih lama lagi, *vog* berpotensi meningkatkan risiko penyakit pernapasan, risiko penyakit kardiovaskular, dan risiko kanker. Kelompok yang rentan terhadap paparan *vog* adalah bayi dan anak-anak, serta orang dewasa yang mengalami gangguan kesehatan.

Volcanic smog atau *vog* juga berpotensi merusak ekosistem, misalnya menyebabkan daun-daun tumbuhan menjadi seperti terbakar sehingga menghambat pertumbuhan bahkan menyebabkan kegagalan panen. Penurunan kesuburan tanah dapat juga dihubungkan dengan berubahnya komposisi tanah akibat tercemar oleh *vog*. Kandungan sulfur di dalam *vog* tentu saja akan berpengaruh terhadap pH air sehingga kehidupan akuatik menjadi terganggu. Dalam ruang lingkup yang lebih luas, *vog* juga dapat menyebabkan berubahnya pola cuaca yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap keseimbangan ekosistem

Daftar Pustaka

- Annisha, W. (2017). *Buku pintar mengenal bencana alam di Indonesia: Gunung meletus*. Erlangga.
- Boretti, A. (2024). Reassessing the cooling that followed the 1991 volcanic eruption of Mt. Pinatubo. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 256, Article 106187. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106187>
- Bradley, R. S. (1988). The explosive volcanic eruption signal in Northern Hemisphere continental temperature records. *Climatic Change*, 12(3), 221–243. <https://doi.org/10.1007/BF00139431>
- Fandari, A. E., Daryanto, A., & Suprayitno, G. (2014). Pengembangan energi panas bumi yang berkelanjutan. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, 17(1), 68–82.

- Fischer, E. (2004). *Volcanic forcing on European climate*. Institute for Atmospheric and Climate Science. <http://iacweb.ethz.ch/staff/fischer/volcanic.html>
- Gangolli, S. (1999). *Kamus zat dan pengaruhnya* (2nd ed.). Masyarakat Kerajaan Kimia.
- Geria, I. M. (2015). *Menyikap misteri terkuburnya peradaban Tambora*. Gajah Mada University Press.
- Gerlach, T. M., Westrich, H. R., & Symonds, R. B. (1996). Preeruption vapor in magma of the climactic Mount Pinatubo eruption: Source of the giant stratospheric sulfur dioxide cloud. In C. G. Newhall & R. S. Punongbayan (Eds.), *Fire and mud: Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (pp. 415–433). Philippine Institute of Volcanology and Seismology and University of Washington Press.
- Global Volcanism Program. (2024). *Volcanoes of the world* (Venzke, E., Comp.; v. 5.1.5). Smithsonian Institution. <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW5-2024.5.1>
- Global Volcanism Program. (n.d.). *Mont Pelée*. Smithsonian Institution. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=360050>
- Global Volcanism Program. (n.d.). *Tambora: Volcano photo collection*. Smithsonian Institution. <https://volcano.si.edu/volcano>.
- Hakim, A. F., Krismadiana, Sholihah, F., Ismawati, R., & Dewantari, N. (2023). Potensi dan pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia. *Indonesian Journal of Conservation*, 11(2), 71–77. <https://doi.org/10.15294/ijc.v11i2.40599>.
- Indra, D. M. (2018). Perkembangan Gunung Agung, kebencanaan, dan persoalan pengungsi. *Jurnal Bali Membangun Bali*, 1(1). <https://doi.org/10.51172/jbmb.v1i1.1>
- Lacroix, A. (1904). *La Montagne Pelée et ses éruptions*. Masson et Cie.
- Lide, D. R. (Ed.). (2003). *CRC handbook of chemistry and physics* (84th ed.). CRC Press.
- Mueller, W., Cowie, H., Horwell, C. J., Hurley, F., & Baxter, P. J. (2020). Health impact assessment of volcanic ash inhalation: A comparison with outdoor air pollution methods. *GeoHealth*, 4, Article e2020GH000256. <https://doi.org/10.1029/2020GH000256>

- Nurwahyudin, D. S., & Harmoko, U. (2020). Pemanfaatan dan arah kebijakan perencanaan energi panas bumi di Indonesia sebagai keberlanjutan maksimalisasi energi terbarukan. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(3), 111–123. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10032>
- Occupational Safety and Health Administration. (n.d.). *Hazards*. Dalam *Hydrogen sulfide*. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards>
- Oppenheimer, C. (2003). Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, 27(2), 230–259. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp379ra>
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J.-C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1–4), 17–66.
- Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. (2026). Peta sebaran gunung api aktif di Indonesia. *MAGMA Indonesia*, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://magma.esdm.go.id>
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191–219.
- Robock, A., & Mao, J. (1992). Winter warming from large volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 19(24) [nomor issue tidak tercantum pada draf asli, diasumsikan issue 24 — mohon dikonfirmasi], 2405–2408.
- Rosen, J. (2015, April 7). Benchmarks: May 8, 1902: The deadly eruption of Mount Pelée. *Earth Magazine*. <https://www.earthmagazine.org/article/benchmarks-may-8-1902-deadly-eruption-mount-pelee>
- Salsabila, R., Suwarman, R., & Abdillah, M. (2022). Perubahan temperatur setelah letusan Pinatubo 1991 dari luaran model CMIP5. *Jurnal Sains Dirgantara*, 19(1), 55–64. <https://doi.org/10.30536/j.jsd.2022.v19.a3557>
- Self, S., & Rampino, M. R. (1981). The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, 294(5843), 699–704. <https://doi.org/10.1038/294699a0>
- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes* (2nd ed.). Academic Press.

- Simkin, T., & Fiske, R. S. (1983). Krakatau 1883—The volcanic eruption and its effects. Smithsonian Institution Press.
- Sparks, R. S. J., Self, S., Grattan, J. P., Oppenheimer, C., Pyle, D. M., & Rymer, H. (2005). Super-eruptions: Global effects and future threats (2nd ed.). *The Geological Society of London*. <https://www.geolsoc.org.uk/supereruptions>
- Stothers, R. B. (1984). The great Tambora eruption in 1815 and its aftermath. *Science*, 224(4654), 1191–1198.
- U.S. Geological Survey, Communications and Publishing. (2016, December 8). *Map of volcanoes in Indonesia* [Map]. <https://www.usgs.gov/media/images/map-volcanoes-indonesia>
- Wellburn, A. R. (1994). Air pollution and climate change: The biological impact (2nd ed.). Longman Scientific & Technical.
- Yamamoto, T., Takarada, S., & Suto, S. (1993). Pyroclastic flows from the 1991 eruption of Unzen volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 55(3), 166175. <https://doi.org/10.1007/BF00301514>
- .