

KAJIAN PENINGKATAN KANDUNGAN AEROSOL STRATOSFER AKIBAT LETUSAN GUNUNG BERAPI

Saipul Hamdi

Peneliti Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lapan
e-mail: saipulh@yahoo.com

RINGKASAN

Indonesia memiliki 82 gunung berapi aktif yang berjejer di sepanjang Pulau Sumatera hingga Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Utara, dan Halmahera, letusannya berpotensi menyemburkan aerosol hingga ke stratosfer jika terjadi letusan, dan dapat terdistribusi ke tempat yang jauh dan luas mengikuti sirkulasi global. Tulisan ini disusun untuk mengkaji peningkatan aerosol stratosfer sebagai dampak dari beberapa letusan gunung berapi baik yang berada di Indonesia maupun di luar Indonesia. Salah satu dampak debu dan aerosol gunung berapi adalah menahan laju sinar matahari sehingga terjadi pendinginan global. Hal ini pernah terjadi pada tahun 1816, yaitu satu tahun setelah terjadi letusan Gunung Tambora (1815), sehingga tahun 1816 disebut sebagai *year without summer*. Letusan Gunung Merapi (2010) dan Kelud (2014) juga menghasilkan debu dan aerosol vulkanis yang menyebar hingga ratusan km dari pusat letusannya. Selain menahan pancaran sinar matahari dan menyebabkan pendinginan global, aerosol vulkanis juga dapat bereaksi dengan oksigen dan uap air membentuk aerosol sulfat yang berdampak pada hujan asam. Peningkatan kandungan aerosol stratosfer dipercaya akan memberikan dampak jangka panjang terhadap iklim di Indonesia secara khusus, atau iklim dunia secara global.

1 PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara yang terletak pada titik pertemuan tiga lempeng tektonis (*tectonic plate*) yang saling bergerak, yaitu Lempeng Euresia, Lempeng Indo Australia, dan Lempeng Pasifik, memiliki 82 gunung berapi aktif yang berjejer di sepanjang Pulau Sumatera, Pulau Jawa, hingga Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Utara dan Kepulauan Halmahera. Gunung-gunung berapi aktif tersebut berpotensi mengeluarkan aerosol vulkanis yang mampu menembus tropopause dan masuk ke dalam lapisan stratosfer. Di dalam catatan sejarah dunia, dua gunung berapi di Indonesia yang memuntahkan aerosol vulkanis dalam jumlah yang sangat banyak adalah Gunung Kelud (1919) dan Gunung Tambora (1815). Gunung Tambora bahkan menyebabkan fenomena *year without summer* pada tahun 1816 khususnya di negara-negara belahan bumi utara. Untuk gunung berapi di

luar Indonesia, Gunung Pinatubo (1991) dan El Chichon (1982) merupakan dua gunung berapi yang letusannya banyak diteliti oleh peneliti di seluruh dunia dan memberikan kemajuan ilmu pengetahuan yang cukup penting.

Pada peristiwa letusan gunung berapi ratusan ton sulfur akan dilepaskan ke atmosfer dengan kecepatan vertikal tertentu sehingga dapat menembus tropopause dan mencapai lapisan stratosfer. Di lapisan stratosfer sulfur akan terdistribusi ke tempat yang lebih luas dan jauh mengikuti sirkulasi global. Sulfur juga dapat bereaksi dengan oksigen dan uap air membentuk aerosol sulfat. Selain itu, debu vulkanis yang mengandung aerosol sulfat juga mampu menahan pancaran sinar matahari yang memasuki atmosfer bumi (transmitansi) sehingga berpotensi menyebabkan pendinginan global. Peningkatan jumlah aerosol di stratosfer menyebabkan terjadinya perubahan iklim karena berkurangnya radiasi

matahari tingkat permukaan (insolasi = *incoming solar radiation*) akibat tertahan oleh aerosol. Pada letusan gunung Pinatubo tahun 1991, diyakini bahwa letusannya telah mempengaruhi pembentukan awan cirrus secara global melalui *homogeneous freezing* dari aerosol H_2SO_4 setidaknya pada 2 tahun pertama setelah letusan (Liu, 2002).

Pemantauan dan penelitian aerosol stratosfer dapat dilakukan dengan beberapa cara baik secara *in-situ* maupun *remote*. Lidar atau *light detect and ranging* sebagai salah satu instrumen yang dimiliki oleh PSTA merupakan perangkat yang dapat diandalkan dalam pemantauan aerosol jangka panjang yang sangat disarankan. Indonesia dapat bergabung dengan jaringan lidar pemantau aerosol dunia yang dimotori oleh pemerintah Jepang. Selain ditempatkan pada *ground station*, lidar juga dapat ditumpangkan pada pesawat ruang angkasa, dan bahkan pada satelit yang mengorbit bumi. Penempatan lidar pada *ground station* tentu saja hanya dapat memantau *aerosol background* pada satu titik pengamatan saja secara kontinu, dan penempatan lidar pada pesawat ruang angkasa akan memberikan *viewing* yang lebih luas namun tidak kontinu. Tulisan ini disusun dalam upaya untuk mengkaji peningkatan kandungan aerosol di atmosfer, khususnya di lapisan stratosfer, yang disebabkan oleh beberapa letusan gunung berapi dahsyat yang tercatat di dalam sejarah, baik di Indonesia maupun di luar Indonesia.

2 ASAL MULA AEROSOL STRATOSFER

Aerosol adalah kumpulan dari partikel-partikel padat atau cair yang tersuspensi di dalam medium gas dalam waktu yang cukup lama, dan umumnya berukuran 0,001-100 μm (Hamdi, 2013). Kumpulan partikel ini merupakan suatu sistem koloid (campuran heterogen antara dua zat

atau lebih) yang terdiri dari fase eksternal (pendispersi) dan fase internal (terdispersi). Fase terdispersi tersebar secara merata di dalam medium pendispersi, dan dapat berupa cairan atau padatan, sedangkan medium pendispersi berupa gas. Sistem koloid akan berupa awan atau embun jika partikel internalnya merupakan partikel zat cair, dan sistem koloid akan berupa asap atau debu jika fase internalnya berupa zat padat. Aerosol tersebar secara luas pada hampir seluruh permukaan bumi hingga mencapai lapisan stratosfer, dan dapat terbentuk secara alami ataupun akibat kegiatan manusia (antropogenesis). Pengetahuan tentang distribusi ukuran aerosol pada tingkatan tertentu di atmosfer adalah sangat penting untuk memahami mekanisme pembentukan, transportasi, dan pembersihan aerosol dari alam.

Distribusi aerosol terhadap ketinggian sangat bergantung pada musim dan lokasi. Secara umum, kandungan aerosol di atmosfer akan berkurang mengikuti bertambahnya ketinggian, dan menjadi nol pada ketinggian 35 km. Pada tingkat permukaan hingga *Planetary Boundary Layer* (PBL) konsentrasi aerosol sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, dan di atas PBL dipengaruhi oleh alam. Peristiwa alam yang secara aktif dapat menambah jumlah aerosol di alam, terutama di atmosfer atas, adalah letusan gunung berapi. Beberapa letusan gunung berapi dahsyat yang menekan aerosol hingga memasuki lapisan stratosfer di antaranya adalah letusan Gunung Tambora (1815), El Chichon (1982), Pinatubo (1991), dan Kelud (1919). Jumlah aerosol vulkanis yang dihembuskan memasuki stratosfer sangat bergantung pada jenis dan kekuatan letusannya.

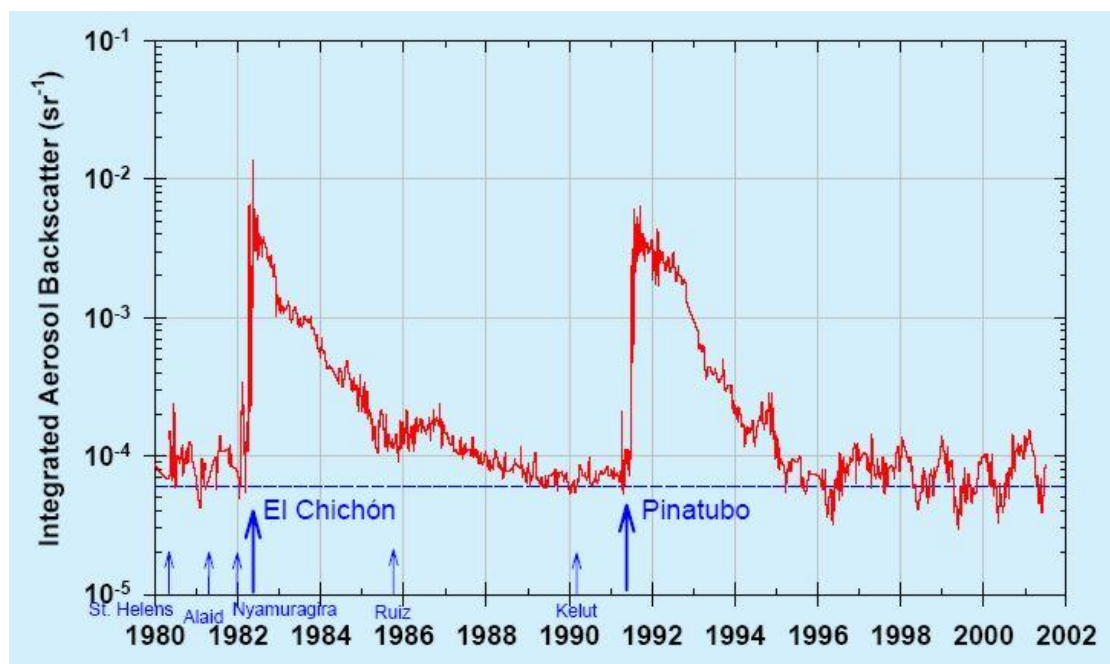
Untuk menyatakan jumlah aerosol yang ada di atmosfer maka digunakan beberapa besaran, misalnya koefisien ekstingsi (σ), *Backscattering ratio* (R), *part per million* (ppm), dan

Integrated Backscattering Coefficients (IBC). Koefisien ekstingsi aerosol menggambarkan kekuatan aerosol dalam melemahkan cahaya yang melaluinya yang disebabkan oleh penyerapan dan penghamburan oleh aerosol tiap satuan panjang (satuan: km^{-1}). *Backscattering ratio* atau R menunjukkan rasio hamburan balik yang disebabkan oleh aerosol dan udara. Adanya aerosol di udara akan menyebabkan nilai $R > 1$. IBC merupakan besaran yang digunakan untuk menggambarkan jumlah aerosol yang ada pada suatu rentang ketinggian tertentu, dan diperoleh dengan cara menghitung (mengintegrasikan) jumlah koefisien hamburan balik pada rentang ketinggian yang dibutuhkan, biasanya 17-35 km.

Salah satu dampak aerosol sulfat adalah menahan laju sinar infra merah matahari sehingga terjadi pengurangan insolasi. Jumlah kandungan aerosol di stratosfer dalam keadaan tidak dipengaruhi oleh letusan gunung berapi disebut sebagai *aerosol background*. Gambar 2-1 adalah *integrated aerosol*

backscatter pada ketinggian 15-22 km diamati oleh NOAA di Mauna Loa periode tahun 1980-2002. Adanya letusan Gunung El-Chichon (1982) dan Gunung Pinatubo (1991) telah meningkatkan kandungan aerosol hingga lebih dari 100 kali lipat secara tiba-tiba dari kandungan *background* rata-ratanya sebesar $5 \times 10^{-5} \text{ sr}^{-1}$. Kandungan aerosol kembali ke keadaan normalnya secara berangsur-angsur dalam 4-5 tahun setelah letusan (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/about/ozone.html>).

Tabel 2-1 menjelaskan perkiraan jumlah aerosol yang dilepaskan ke atmosfer pada beberapa letusan gunung berapi. Letusan Gunung Agung pada Bulan Maret 1963 tercatat menghasilkan aerosol dalam jumlah 16-30 Tg (Terra-gram) ke atmosfer, dengan latar belakang aerosol sejumlah < 1 Tg. Perkiraan ini hampir sama dengan jumlah aerosol yang dihasilkan oleh Gunung Pinatubo pada letusan tahun 1991. Letusan Gunung Cero Hudson (1991) hanya melepaskan 3 Tg aerosol ke atmosfer.

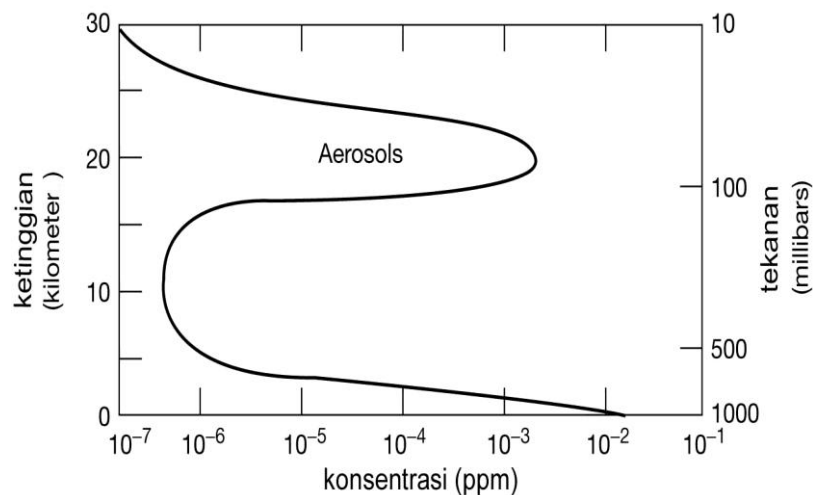


Gambar 2-1: Pengukuran aerosol menggunakan lidar di Mauna Loa pada ketinggian 15-33 km (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/about/ozone.html>).

Tabel 2-1: PERKIRAAN JUMLAH AEROSOL YANG DILEPASKAN KE ATMOSFER PADA LETUSAN BEBERAPA GUNUNG BERAPI

Letusan	Waktu Kejadian	Perkiraan aerosol yang dilepaskan (Tg)
Stratospheric background	1979	< 1
Katmai	Juni 1912	20
Agung	Maret 1963	16-30
Fuego	Oktober 1974	3-6
El Chichon	April 1982	12
Mt. Pinatubo	Juni 1991	30
Cerro Hudson	Agustus 1991	3

Sumber : McCormick et al, 1995

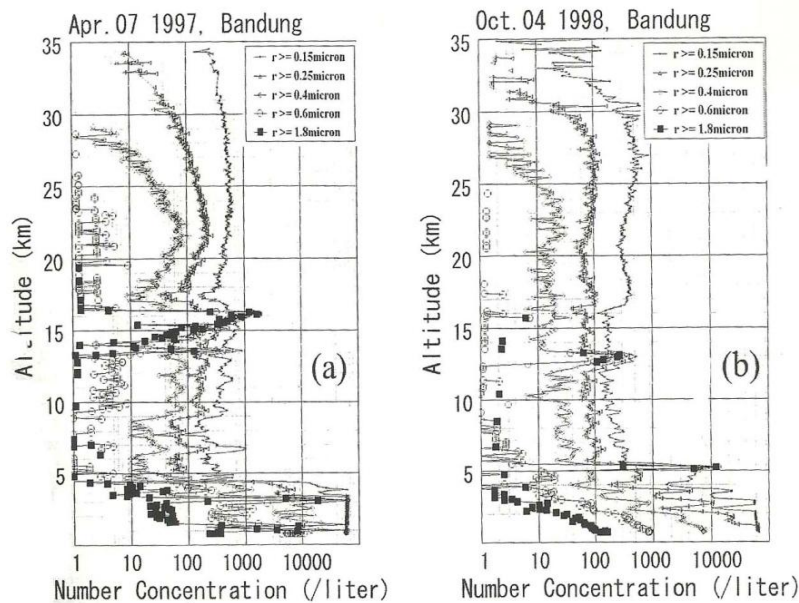


Gambar 2-2: Distribusi aerosol terhadap ketinggian

Ilustrasi distribusi vertikal aerosol hingga ketinggian 30 km digambarkan pada Gambar 2-2. Pada gambar tersebut aerosol stratosfer yang berasal dari letusan gunung berapi terkonsentrasi pada ketinggian 16 km (tropopause) hingga 30 km. Aerosol permukaan bisa menembus lapisan tropopause karena adanya konveksi atau injeksi kuat yang terutama terjadi di daerah tropis.

Pengukuran distribusi vertikal aerosol menggunakan *Optical Particle Counter* atau OPC pada tahun 1997 dan 1998 di Bandung (Gambar 2-3) menunjukkan bahwa variasi terhadap waktu tidak begitu penting, dan nilai hamburan balik yang dapat dikonversikan menjadi volume adalah dalam besaran yang cukup dan mengalami peningkatan secara perlahan (Yasui, 2001). Penelitian ini juga memberikan kesimpulan bahwa semakin kecil

diameter aerosol ($r > 0,15\mu$) maka semakin dominan pula keberadaannya dibandingkan dengan aerosol yang berdiameter lebih besar ($r > 0,6\mu$). Selain menggunakan OPC, distribusi vertikal aerosol juga dapat dihitung menggunakan *light detect and ranging* (Lidar) yang telah dilakukan oleh PSTA Lapan Bandung sejak tahun 1997 secara berkesinambungan, yaitu dengan menghitung *Integrated Backscattering Coefficients* (IBC). Hasilnya menunjukkan bahwa IBC di atas Bandung pada ketinggian 18-35 km adalah dalam orde 10^{-6} sr^{-1} . Dengan ketinggian rata-rata lapisan aerosol *background* berkisar antara 20-25 km. Nilai ini merupakan nilai yang sangat kecil dan menandakan bahwa lapisan stratosfer di atas Jawa Barat masih sangat bersih dari debu aerosol (Hamdi, et.al.,2005).

Gambar 2-3: Distribusi vertikal aerosol di atas Bandung (Yasui *et al*, 2001)

Dalam arah horizontal, aerosol stratosfer dapat menyebar ke tempat yang jauh (*remote area*) mengikuti sirkulasi global atmosfer. Pada umumnya, sirkulasi akan mengangkat partikulat menuju elevasi yang tinggi di daerah lintang rendah (tropis) kemudian menyebar menuju lintang menengah dan turun kembali. Selain itu, sirkulasi juga akan membawa partikulat menuju arah Barat-Timur. Semakin jauh penyebarannya maka semakin berkurang juga konsentrasinya. Aerosol di stratosfer memiliki waktu hidup lebih lama dibandingkan dengan aerosol troposfer, dan ini dikaitkan dengan dampaknya terhadap iklim (Rasch *et al.*, 2008).

3 BEBERAPA LETUSAN BESAR GUNUNG BERAPI DALAM SEJARAH

3.1 Di Luar Indonesia Letusan Gunung El Chichón

Gunung El Chichón yang terletak di Chiapas, Mexico, meletus pada bulan Maret-April 1982 pada skala 5 *Volcanic Explosivity Index* (VEI). Letusan ini menghasilkan 7 juta ton sulfur dioksida (SO₂) dan 20 juta ton partikulat. Partikulat dan sulfur dioksida memasuki stratosfer dan bersirkulasi selama 3 minggu (Robock, 2002). Efek letusan terhadap iklim antara lain

terjadinya musim dingin yang lebih hangat di belahan bumi utara pada tahun 1982-1983, dan menyebabkan suhu udara di Amerika Utara, Eropa, dan Siberia lebih hangat dari pada keadaan normalnya. Ini diduga kuat disebabkan oleh aerosol vulkanis yang memasuki stratosfer menyebabkan pemanasan dengan cara mengubah pola angin ke dalam fase positif osilasi antartika. Pada waktu yang sama, di daerah Alaska, Greenland, Asia Tengah dan China terjadi musim dingin yang lebih dingin dari biasanya. Pengamatan *incoming solar radiation* di Mexico City dan Vancouver pada bulan ke-9 setelah terjadinya letusan menghasilkan kesimpulan bahwa telah terjadi penurunan intensitas radiasi matahari langsung (*direct solar radiation*) di tingkat permukaan sebagai dampak dari peningkatan kandungan aerosol stratosfer. Penurunan *direct incoming solar radiation* terjadi sebesar 38% di Alaska, 33% di Vancouver, dan 30% di Meksiko (Galindo *et al.*, 1996)

Letusan Gunung Pinatubo

Gunung Pinatubo terletak di Pulau Luzon, Filipina, dan meletus pada tahun 1991. Letusan ini merupakan letusan terbesar kedua pada abad ke-20. Jumlah aerosol yang dilepaskan ke

atmosfer oleh Gunung Pinatubo adalah diperkirakan sebanyak 30 Tg, namun jumlah ini masih jauh lebih sedikit dibandingkan dengan perkiraan aerosol yang dilepaskan oleh letusan Gunung Tambora pada tahun 1815 yaitu >100 Tg, ataupun Gunung Krakatau tahun 1883, yaitu ~ 50 Tg (Pinto *et al.*, 1989). Aerosol dalam jumlah yang sangat banyak tersebut memberikan dampak berupa penurunan intensitas radiasi matahari langsung (*direct solar radiation*) sebesar 25-30 % pada lokasi pengamatan yang disebar pada 4 lintang yang berbeda. Jumlah rata-rata *Aerosol Optical Depth* (AOD) total yang dihitung pada 10 bulan pertama setelah letusan adalah sebesar 1,7 kali lebih besar daripada yang teramati mengikuti letusan gunung El Chichón pada tahun 1982. Sementara itu, pada bulan September 1992 temperatur troposfer bawah global dan pada belahan bumi utara telah mengalami penurunan masing-masing sebesar 0,5 dan 0,7 °C dibandingkan dengan sebelum terjadinya letusan. Terjadinya *global cooling* ini dikaitkan dengan berkurangnya jumlah konsentrasi uap air di troposfer (Soden, *et al.*, 2002).

Pemantauan aerosol stratosfer di Mauna Loa menggunakan lidar oleh NOAA menunjukkan peningkatan *Integrated Backscattering Coefficient*

(IBC) yang sangat tinggi ketika terjadi letusan Gunung Pinatubo pada tahun 1991. Peningkatan hampir sebesar 80 kali lipat terjadi pada saat letusan, dan kemudian menurun secara perlahan-lahan dalam 5 tahun, bahkan efeknya masih terasa hingga 10 tahun kemudian. Letusan Pinatubo tersebut berpotensi menurunkan konsentrasi ozon kolom total sebesar 10% di daerah lintang menengah. Kedahsyatan letusan Gunung Pinatubo diungkapkan secara fotografi melalui Gambar 3-1.

Kolom ozon di daerah tropis teramati berkurang sebanyak 6-8 % pada periode beberapa bulan setelah terjadinya letusan Gunung Pinatubo. Pengurangan kolom ozon terbesar teramati pada ketinggian di bawah 28 km khususnya pada ketinggian 24-25 km, yaitu sebesar 20%. Namun demikian, sedikit peningkatan kolom ozon teramati pada ketinggian di atas 30 km. Setelah 6 bulan dari terjadinya letusan, kolom ozon rata-rata global juga mulai menunjukkan penurunan dibandingkan dengan siklus tahunan rata-rata tahun 1979-1990. Bahkan, pada pertengahan tahun 1992 penurunan kolom ozon rata-rata tersebut telah melewati konsentrasi minimum yang tercatat pada periode 1979-1990 (McCormick, 1995).



Gambar 3-1: Letusan Gunung Pinatubo di Philipina pada tahun 1991. (Photo: D. Harlow)

3.2 Di Indonesia

Letusan Gunung Kelud

Gunung Kelud terletak di Propinsi Jawa Timur, kira-kira 27 km sebelah timur Kota Kediri, dan memiliki ketinggian 1.731 meter. Beberapa letusan Gunung Kelud yang pernah terjadi pada abad ke-20 adalah letusan pada tahun-tahun 1901, 1919, 1951, 1966, dan 1990, sedangkan pada abad ke-21 ini adalah letusan tahun 2007 dan 2014. Letusan terbesar yang tercatat dalam sejarah adalah letusan tahun 1919. Letusan pada tahun 1919 ini menyemburkan debu aerosol dengan jumlah yang sangat banyak hingga ketinggian lebih dari 10.000 meter. Pada ketinggian yang lebih rendah debu aerosol menyebar ke arah timur dan meluas hingga ke Bali, sedangkan pada ketinggian yang lebih tinggi debu aerosol menyebar ke arah Barat. Sedikitnya catatan sejarah menyebabkan tidak diperolehnya angka pasti mengenai jumlah semburan debu aerosol. Perhitungan dan koreksi dibuat untuk memperkirakan jumlahnya melalui beberapa metode.

Pada tanggal 14 Februari 2014 Gunung Kelud kembali meletus dan menyebabkan hujan kerikil yang cukup lebat yang dirasakan dalam radius 10 km dari pusat letusan. Di Yogyakarta, teramati hampir seluruh wilayah tertutup oleh abu vulkanis yang cukup pekat dan diperkirakan mencapai ketebalan 2 cm, melebihi ketebalan yang dihasilkan oleh letusan gunung Merapi 2010. Pencitraan visual yang dilakukan enam jam setelah letusan dimulai menunjukkan bahwa awan debu Kelud telah memasuki ketinggian 18-20 km dalam jumlah yang sangat banyak, bahkan puncak awan debu Kelud mencapai ketinggian 26 km. Debu ini menyebar pada area yang sangat luas dan cukup jauh dari Gunung Kelud ke arah barat hingga barat daya mengikuti angin timur hingga 1.000 km jauhnya (Sudibyo, 2014).

Letusan Gunung Galunggung

Letusan Gunung Galunggung pada tahun 1982 telah menyebabkan dampak langsung terhadap atmosfer yang diamati melalui Observatorium Boscha di Lembang. Satu hari setelah Gunung Galunggung meletus, atmosfer bumi pada pagi dan senja hari tampak jauh lebih merah dibandingkan hari-hari biasa, dan diduga disebabkan oleh penambahan partikel vulkanis sebagai hasil dari letusannya (Luthfi *et al.*, 1984). Partikel vulkanis tersebut menghamburkan cahaya matahari secara selektif, lebih banyak cahaya biru yang dihamburkan dibandingkan dengan cahaya merah. Pada hari ke-4 setelah letusan, terjadi peningkatan nilai rata-rata koefisien ekstingsi sebesar 3 kali lipat yang menyebabkan menurunnya transparansi atmosfer. Turunnya transparansi atmosfer disebabkan karena bertambahnya partikel mikro vulkanis sisa letusan Gunung Galunggung yang menahan cahaya tampak matahari. Turunnya transparansi atmosfer dapat dikaitkan dengan meningkatnya koefisien ekstringsi aerosol atmosfer.

Letusan Gunung Tambora

Letusan Gunung Tambora pada tahun 1815 merupakan letusan yang sangat dahsyat dengan kekuatan 7 VEI atau setara dengan 27 megaton TNT (Briffa, *et al.*, 1998) dengan memuntahkan magma hingga ketinggian 43.000 meter. Gunung yang terletak di Pulau Sumbawa ini mengeluarkan letusan yang terdahsyat pada tanggal 11 April 1815, dan diketahui telah memengaruhi iklim secara global. Sejumlah 30-32 km³ magma dilepaskan jauh ke lapisan stratosfer dan 53-58 juta ton SO₂ pada 24 jam pertama, dan ini cukup untuk menghasilkan 93-118 Tg aerosol sulfat stratosfer (Self *et al.*, 2004). Akibat letusan ini maka asam sulfat tersebar ke seluruh belahan dunia dan menyebabkan penurunan intensitas radiasi matahari tingkat permukaan hingga mencapai

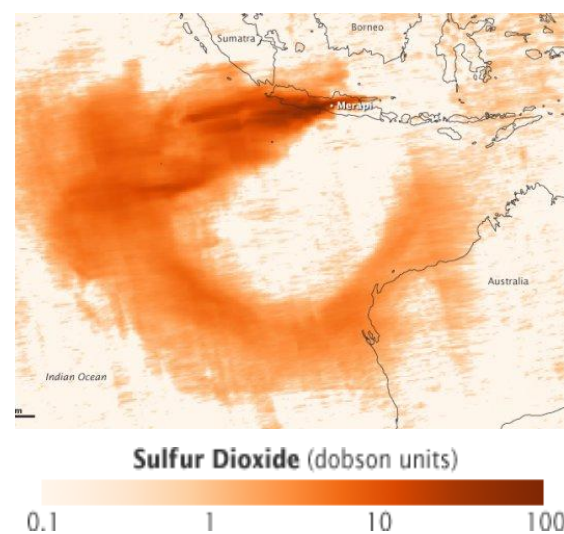
75%. Abu halusnya yang menembus stratosfer telah menyebabkan penurunan temperatur belahan bumi bagian utara. Berdasarkan kajian citra satelit, penelitian lapangan, dan studi pustaka, diketahui bahwa abu vulkanis yang dihasilkan dari letusan Gunung Tambora ini berupa endapan awan panas dan telah menyelimuti hampir seluruh permukaan semenanjung Tambora dan menyebar hingga mencapai pantai Sanggar, Kananga, dan Doropeti, atau lebih kurang 30 km dari pusat letusan (Sigurdson & Carey, 1989; Kartadinata *et al.*, 1997; Sutawijaya *et al.*, 2005).

Akibat banyaknya aerosol sulfat yang dihembuskan ke lapisan stratosfer maka pada musim semi dan musim panas tahun 1816 negara-negara yang berada di belahan bumi utara mengalami musim dingin yang berkepanjangan dan nyaris tidak mengalami musim panas sama sekali. Tahun 1816 ini disebut sebagai *year without summer* atau tahun tanpa musim panas, Temperatur normal dunia mengalami penurunan 0,4 – 0,7 °C dan menjadi penyebab terjadinya kelangkaan pangan di bumi belahan utara secara luas. Dilaporkan bahwa di daerah Connecticut (wilayah timur laut Amerika Serikat) telah tertutup oleh es di awal Juni 1816, demikian juga dengan New England, Albany, New York, dan Dennysville serta Maine. Keadaan yang berlangsung selama lebih dari 3 bulan tersebut menyebabkan kegagalan panen yang luas di negara-negara belahan bumi utara dan menyebabkan kenaikan harga bahan-bahan pangan secara drastis (Wikipedia).

Letusan Gunung Merapi

Gunung Merapi terletak di Daerah Istimewa Yogyakarta, sekitar 25 km arah Utara. Letusan Gunung Merapi pada akhir Oktober 2010 juga menyebarkan abu vulkanis yang mengandung aerosol ke daerah yang jauh. Dengan kekuatan letusan berskala 4 VEI yang setara dengan letusan

Gunung Galunggung (1982-1983) dan Gunung Agung (1963) berpotensi untuk memengaruhi iklim dunia bertahun-tahun kemudian akibat sebaran debu vulkanis dan gas belerang (SO₂) ke lapisan stratosfer. Pada 11 November 2010, NASA juga mengeluarkan peta konsentrasi sulfur (belerang) dioksida pada 4-8 November 2010. Sulfur merupakan gas berwarna yang bisa membahayakan kesehatan manusia, sekaligus mendinginkan iklim di Bumi, juga memicu hujan asam. Gambar 3-2 menunjukkan sebaran sulfur dioksida dari letusan Gunung Merapi pada tanggal 4-8 November 2010 diamati menggunakan Ozone Monitoring Instrumen milik NASA. *Volcanic Ash Advisory Center* di Darwin, Australia, melaporkan bahwa awan SO₂ telah mencapai Samudera Hindia antara ketinggian 12.000 dan 15.000 meter di bawah tropopause. Pada ketinggian tersebut, SO₂ akan menjalankan serangkaian reaksi kimia yang mempengaruhi lingkungan, misalnya bereaksi dengan uap air membentuk ion sulfat yang berperan sebagai prekursor asam sulfur. Ion-ion sulfat juga akan membentuk partikel yang memantulkan sinar matahari kembali ke luar angkasa.



Gambar 3-2: Penyebaran konsentrasi SO₂ letusan Gunung Merapi tanggal 4-8 November 2010. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=46881>, diunduh tanggal 16 Januari 2014

4 PENUTUP

Beberapa letusan gunung berapi yang menyemburkan debunya yang mengandung aerosol diantaranya adalah letusan Gunung Tambora (Jawa Timur 1815) dan Gunung Pinatubo (Philipina 1991). Kedua gunung tersebut telah meningkatkan kandungan aerosol stratosfer dalam jumlah yang sangat banyak dan mempengaruhi iklim global dalam waktu singkat melalui efek absorpsi radiasi matahari. Letusan Gunung Kelud (Jawa Timur) pada awal tahun 2014 juga menyebabkan peningkatan aerosol stratosfer yang diamati menggunakan data-data satelit. Namun, hingga saat ini masih sedikit tulisan yang membahas secara ilmiah peningkatan jumlah aerosol stratosfer yang berasal dari letusan Gunung Kelud tersebut dan dampaknya terhadap lingkungan. Dengan peningkatan aktivitas beberapa gunung berapi di Indonesia akhir-akhir ini maka sangat berpotensi dalam meningkatkan jumlah aerosol stratosfer jika terjadi letusan yang dahsyat. Peningkatan kandungan aerosol stratosfer dipercaya akan memberikan dampak jangka panjang terhadap iklim di Indonesia secara khusus, atau iklim dunia secara global.

Lapan khususnya Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer sebagai salah satu institusi yang memiliki kompetensi terhadap perubahan komposisi atmosfer (termasuk di dalamnya aerosol stratosfer) sangat disarankan untuk melakukan pemantauan kandungan aerosol stratosfer secara kontinu baik menggunakan peralatan *in-situ* misalnya LIDAR, ataupun menggunakan satelit sumber daya alam yang ada. Pemantauan secara terus-menerus akan meningkatkan kompetensi Lapan dalam penguasaan sains atmosfer, sehingga dapat memberikan peringatan dini akan ancaman aerosol stratosfer jika terjadi letusan gunung berapi di Indonesia.

DAFTAR RUJUKAN

Briffa, K.R., Jones, P.D., Schweingruber,

F.H. and Osborn T.J., 1998. *Influence of Volcanic Eruptions on Northern Hemisphere Summer Temperature Over 600 Years*, *Nature* 393: 450-455.

Galindo, I., K. Ya. Kondrat'ev, and G/Zenteno, 1996. *Atmospheric Aerosol Optical Thickness After The Mt. El Chichon Eruption from Observations in Mexico City and Vancouver*, *Atmos, Oceanic Opt.*, Vol. 9 No 3., pp. 227-230.

Hamdi, S., 2013. *Dampak Aerosol Terhadap Lingkungan Atmosfer*, *Berita Dirgantara LAPAN*, Vol 14 No 1. pp 9-16.

Hamdi, S., S. Kaloka, I. Sofiati, A. Budiyono, 2005. *Aerosol Background Lapisan Stratosfer di Atas Bandung (6°54' LS 107°35' BT) berdasarkan Penelitian Tahun 1997-2000 Menggunakan Raman Lidar*, *Jurnal Sains Dirgantara* Vol. 3 No 1, pp.12-23.

Kartadinata, M. N., Budianto, A., Wirakusumah, A. D., Hadisantoso, R.D., 1997. *Pyroclastic flow Deposits Erupted by the 1815 Tambora: Distribution, Characteristics of the Deposits and Interpretation of the 1815 Eruption Mechanism*, *Volcanological Survey of Indonesia*, Unpublished report.

Liu, X., Joyce E.P., 2002. *Effect of Mount Pinatubo H₂SO₄/H₂O Aerosol on Ice Nucleation in the Upper Troposphere using a Global Chemistry and Transport Model*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No D12.

Luthfi, H., C. Nurwendaya, B. Hidayat, 1984. *Transparansi Angkasa Sebelum dan Sesudah Letusan Gunung Api: Kasus Angkasa Lembang Tahun. 1982*, *Proceedings ITB* Vol 17, No. 1. pp.11-27.

McCormick, M.P., L.W. Thomason, C.R. Trepte, 1995. *Atmospheric Effects of Mt. Pinatubo Eruption*, *Nature* 373, pp.399-404.

NASA Earth Observatory. 2010. *Eruption*

- at Mount Merapi, Indonesia, diakses dari <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=46881> pada tanggal 16 Januari 2014.
- Pinto, J. R., R. P. Turco, O. B. Toon, 1989. *J. geophys. Res.* 94, pp.11165-11174.
- Rasch, P. J., Tilmes, S., Turco, R. P., Robock, A., Oman, L., Chen, C., et al., 2008. *An Overview of Geoengineering of Climate using Stratospheric Sulfate Aerosols*, Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 366(1882), pp.4007-4037.
- Robock, A., 2002. *Volcanic Eruption, El Chichón*, Encyclopedia of Global Environment Change, Vol. 1., @John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, pp. 736-736.
- Self, S., R. Gertisser, T. Thordarson, M.R. Rampino, and J.A. Wolff, 2004. *Magma Volume, Volatile Emissions, and Stratospheric Aerosols from the 1815 Eruption of Tambora*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20608, doi:10.1029/2004 GL0 20925.
- Sigurdson, H., Carey, S., 1989. *Plinian and co-ignimbrite Tephra Fall from the 1815 Eruption of Tambora Volcano*, *Bull. Vulcanol.*, 51, pp.243-270.
- Soden, B.J., R. T. Wetherald, G. L. Stenchikov, A. Robock, 2002. *Global Cooling After Eruption of Mount Pinatubo: a Test of Climate Feedback by Water Vapor*, *Science* 297, pp.727-730.
- Sudiby, M., 2014. *Kala Satelit Memantau Letusan Kelud*, *Majalah Angkasa*, 14 April 2014.
- Sutawijaya, I. S., Sigurdsson, H., Rachmat, H., Pratomo, I., 2005. *The Deadliest Volcanic Eruption of 1815 Tambora Volcano, Sumbawa, Indonesia*. *Proc. Int. Semin. On Quart. Geol.*
- Wikipedia, http://id.wikipedia.org/wiki/Gunung_Tambora#cite_note-Foden1986-7, diunduh tanggal 20 Mei 2014.
- Yasui, M., M. Hayashi, T. Nagai, T. Matsumura, K. Mizutani, T. Itabe, O. Uchino, T. Fujimoto, M. Fujiwara, T. Shibata, S. Kaloka, S. Hamdi, 2001. *Lidar and Optical Particle Counter (OPC) Measurement of Polar and Tropical Stratospheric Aerosols*, *Proceeding of SPIE Vol 4153*, pp.488-495.