

DAMPAK AEROSOL TERHADAP LINGKUNGAN ATMOSFER

Saipul Hamdi

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

RINGKASAN

Aerosol yang dilepaskan ke atmosfer melalui proses letusan gunung berapi dapat tersebar ke tempat yang jauh dan berpotensi memberikan dampak langsung dan tak langsung terhadap iklim. Selain menyebabkan terjadinya pendinginan global, aerosol juga mengubah sifat optis awan sehingga meningkatkan albedo awan dan berpotensi mengurangi jumlah curah hujan. Di lapisan troposfer, aerosol khususnya aerosol sulfat yang terdeposisi ke permukaan melalui proses deposisi basah berpotensi menyebabkan terjadinya hujan asam yang dapat mengganggu keseimbangan zat gizi di dalam tanah bahkan mengancam kehidupan tumbuh-tumbuhan. Dalam kaitannya dengan penipisan lapisan ozon, khususnya di belahan bumi utara, aerosol mengganggu lapisan ozon melalui reaksi denitrifikasi yang menguraikan molekul ozon menjadi oksigen. Reaksi ini terjadi pada musim panas yang menyediakan banyak energi matahari untuk memulai reaksi tersebut.

1 PENDAHULUAN

Aerosol memainkan peranan penting dalam iklim global melalui dua mekanisme, yaitu dampak langsung dan dampak tak langsung. Dampak langsung aerosol terhadap iklim adalah dengan cara menyerap dan menghamburkan radiasi matahari sehingga dapat menyebabkan terjadinya pendinginan global, dan juga meningkatkan albedo awan. Dampak aerosol secara tidak langsung adalah dengan cara memodifikasi sifat optis awan. Keberadaan aerosol di stratosfer banyak disebabkan oleh letusan gunung berapi yang dahsyat, misalnya Gunung Pinatubo (1991) di Filipina, sedangkan sumber aerosol di lapisan troposfer didominasi oleh aktivitas manusia khususnya dalam penggunaan bahan bakar fosil.

Indonesia yang memiliki 400 gunung berapi dan 130 di antaranya merupakan gunung berapi aktif tentu saja memiliki peluang menjadi penyumbang aerosol yang potensial di lapisan stratosfer. Dengan letak geografis yang sangat representatif di khatulistiwa menjadikan gunung api aktif tersebut akan memainkan peranan penting

dalam iklim global jika terjadi letusan yang dahsyat. Berton-ton aerosol sulfat yang dilepaskan dalam letusan gunung berapi masuk ke dalam lapisan stratosfer dapat mencapai ribuan kilometer jauhnya, serta memberikan kontribusi yang nyata dalam perubahan iklim global.

Dalam skala global, aerosol yang dikeluarkan oleh letusan Gunung Pinatubo telah menyebabkan pendinginan global (*global cooling*) dengan penurunan suhu sebesar 0,5-0,7 °C di troposfer bawah dan belahan bumi utara pada September 1992 (Dutton and Christy, 1992). Selain berdampak pada iklim global, aerosol juga diyakini dapat menyebabkan hujan asam, bahkan penipisan lapisan ozon melalui proses *heterogeneous reaction*, khususnya di daerah kutub utara. Makalah ini disusun untuk menguraikan sumber aerosol di lapisan troposfer dan stratosfer, dampak aerosol terhadap iklim global baik langsung maupun tidak langsung, maupun dampaknya terhadap ozon stratosfer, serta kaitan aerosol dengan proses terjadinya hujan asam.

2 AEROSOL DI LAPISAN TROPOSFER DAN STRATOSFER

2.1 Aerosol di Lapisan Troposfer

Aerosol adalah kumpulan dari partikel-partikel padat yang tersuspensi di dalam medium gas dalam waktu yang cukup lama dan memungkinkan untuk diamati dan diukur. Pada umumnya, partikel aerosol berukuran 0,001-100 μm sehingga kasat mata namun keberadaannya tidak dapat dipungkiri. Aerosol terdapat di atmosfer, dari permukaan hingga ketinggian stratosfer. Bahkan tanpa disadari, aerosol pun banyak terdapat di dalam ruangan, terutama ruangan tertutup dengan ukuran yang sangat halus (*nano aerosol*).

Aerosol dapat terbentuk melalui dua cara, yaitu proses buatan dan proses alami yang berasal dari aktivitas makhluk hidup. Pembakaran bahan bakar fosil, umpamanya untuk kegiatan industri dan transportasi, dipercaya memberikan sumbangan yang cukup besar terhadap peningkatan jumlah aerosol atmosfer, khususnya di lapisan troposfer bawah. Kandungan sulfur pada bahan bakar fosil akan menghasilkan aerosol sulfat ke udara. Hampir sebagian besar jumlah aerosol yang terdapat di lapisan troposfer bawah merupakan turunan dari sulfurdioksida yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil. Demikian juga dengan kebakaran hutan yang sering terjadi di beberapa negara, termasuk Indonesia, menghasilkan aerosol dalam jumlah yang sangat banyak dan terdistribusi hingga ke tempat yang sangat jauh (*remote area*).

Aerosol yang dihasilkan dalam peristiwa kebakaran hutan lebih dikenal dengan istilah aerosol organik ataupun *black carbon*.

Aerosol juga dihasilkan oleh tumbuh-tumbuhan berupa senyawa organik tidak stabil (VOC: *volatile organics compounds*). Informasi mengenai mekanisme pelepasan VOC ini masih sangat sedikit yang diketahui mengingat sangat beragamnya jenis vegetasi yang dikenal. Salah satu jenis VOC yang sangat dikenal adalah *Dimethyl Sulfide* (DMS), yaitu jenis VOC utama yang dilepaskan oleh phytoplankton di lautan dan berperan penting dalam siklus sulfur di atmosfer. Selain itu, laut juga menghasilkan aerosol melalui mekanisme *bursting bubbles* pada permukaan laut. Dengan demikian maka lautan merupakan sumber aerosol yang sangat luas bagi atmosfer bumi (Warneck, 1988). Aerosol yang berasal dari laut utamanya merupakan aerosol garam laut misalnya Cl, Na, dan Ca.

Ditinjau dari segi ukuran maka aerosol dapat dibagi menjadi tiga, yaitu inti aitken, inti besar, dan inti raksasa. Namun, klasifikasi terhadap ukuran ini sangat bergantung pada tujuannya (Kumar et al., 2010). Misalnya untuk tujuan kedokteran (toksikologi), aerosol diklasifikasikan menjadi *ultrafine* (< 100 nm), *fine* (< 1000 nm), dan *coarse* (> 1000 nm). Namun demikian, pembatasan klasifikasi tersebut tidaklah disepakati secara tegas, dan sangat bergantung pada tujuan dan penggunaannya.

Tabel 2-1: KLASIFIKASI AEROSOL BERDASARKAN DIAMETERNYA, SERING DIGUNAKAN OLEH METEOROLOGIST

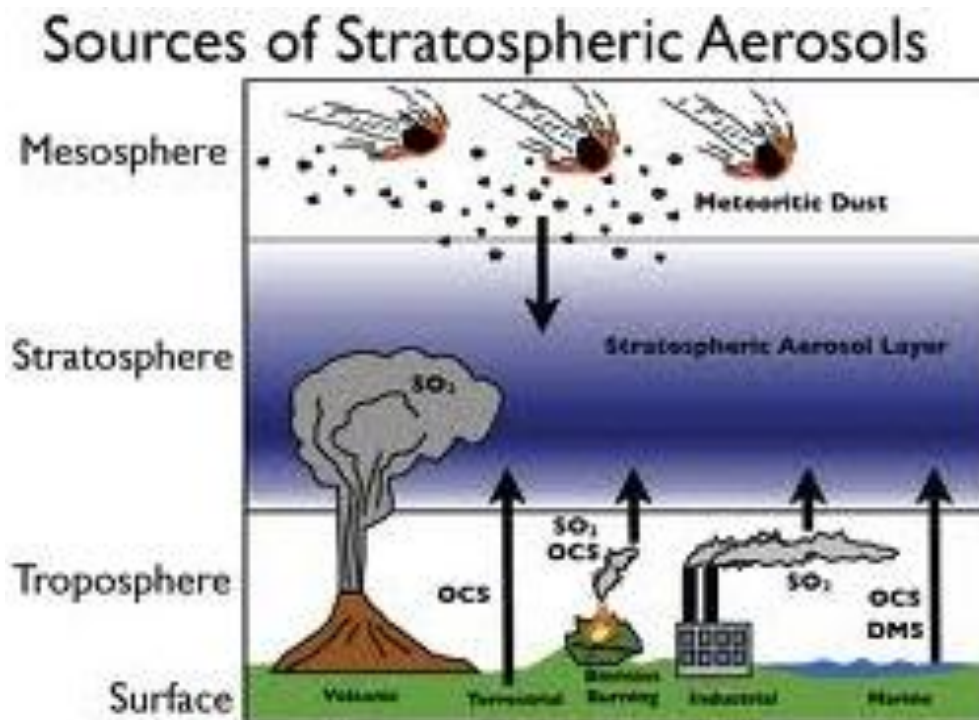
	Ukuran (diameter)	Sumber
Inti Aitken	< 0,001-0.1 μ	Dihasilkan dari pembakaran, dan konversi gas-partikel
Inti besar	0,1 – 1,0 μ	Garam, spora halus, hasil pembakaran, penggumpalan inti Aitken
Inti raksasa	> 1 μ	Garam, spora kasar, hasil dari proses industri

2.2 Aerosol di Lapisan Stratosfer

Munculnya aerosol di lapisan stratosfer didominasi kuat oleh letusan gunung berapi yang menyemburkan ribuan ton sulfur dioksida (SO_2) ke atmosfer di samping material debu lainnya, bahkan mencapai lapisan stratosfer. Gas SO_2 dapat berubah menjadi $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ langsung melalui konversi gas ini ke partikel serta reaksi heterogen dengan uap air melalui bantuan radiasi matahari pada ketinggian tertentu (McCormick et al., 1995). Di lapisan stratosfer, aerosol sulfat ini dapat menyebar hingga ke daerah yang sangat jauh, bergantung pada keadaan meteo makro dan sirkulasi global atmosfer. Letusan gunung berapi yang dahsyat akan meningkatkan secara cepat jumlah aerosol sulfat di lapisan stratosfer. Aerosol sulfat di lapisan stratosfer ini memiliki waktu hidup yang lebih lama dibandingkan dengan waktu hidupnya di lapisan troposfer, khususnya troposfer bawah.

Salah satu letusan gunung berapi yang cukup dahsyat dan tercatat dalam sejarah adalah letusan Gunung Pinatubo di Philipina pada tanggal 15 Juni 1991.

Dunia ilmu pengetahuan mencatat bahwa letusan ini telah mengeluarkan sulfur dioksida yang sangat banyak jumlahnya, dari 500 ton (13 Mei) menjadi 5.000 ton (28 Mei) atau meningkat sebanyak 10 kali lipat dalam 2 minggu pertama setelah letusan (Wikipedia, 2013). Jumlah sulfur dioksida yang dilepaskan selama terjadinya letusan adalah sebanyak 30 juta ton (McCormick et al., 1995). Gas sulfur dioksida akan bercampur dengan air dan oksigen di atmosfer dan berubah menjadi asam sulfat yang akan mempercepat proses penipisan lapisan ozon. Letusan ini juga menjadi salah satu letusan yang mendapatkan perhatian penuh dari seluruh ilmuwan dunia. Beberapa perkembangan ilmu pengetahuan yang diperoleh dari letusan Mt. Pinatubo antara lain berkaitan dengan proses-proses dinamika awan dan aerosol, proses-proses radiatif bumi, dan proses-proses kimia yang terjadi di atmosfer. Selain berasal dari letusan gunung berapi yang dahsyat, aerosol di lapisan stratosfer juga berasal dari debu-debu meteorit di lapisan mesosfer, dan masuk ke dalam lapisan stratosfer melalui proses pengendapan.



Gambar 2-1: Sumber aerosol di stratosfer (<http://noaanews.noaa.gov>)

3 DAMPAK AEROSOL TERHADAP IKLIM GLOBAL

3.1 Dampak Langsung

Dampak aerosol secara langsung terhadap sistem iklim bumi dapat dibagi menjadi dua yaitu (i) meningkatkan proses absorpsi (penyerapan) dan *scattering* (penghamburan) radiasi matahari, dan (ii) menghamburkan, menyerap, dan memancarkan radiasi panas (Lohmann, U. and J. Feichter, 2005). Adanya aerosol di dalam atmosfer bumi akan meningkatkan *Aerosol Optical Depth* (AOD) dan memperluas penutupan awan yang berakibat pada menurunnya radiasi *net* matahari pada puncak awan sehingga terjadilah pendinginan (Lohmann U. and J. Feichter, 2005). Selain itu, aerosol-aerosol karbon dan debu akan menambah *positive forcing* pada puncak atmosfer, setidaknya di daerah dengan albedo permukaan yang tinggi, dan juga secara langsung menghangatkan atmosfer. Efek ini dapat diperkuat jika penyerapan radiasi matahari dari partikel-partikel aerosol ini terjadi di dalam tetes awan (Chylek, et al., 1996). Peningkatan temperatur ini akan mengurangi kelembapan relatif dan bisa juga menurunkan evaporasi tetes awan. Pengurangan penutupan awan dan AOD awan selanjutnya akan memperkuat pemanasan sistem atmosfer bumi.

Akibat penyerapan energi matahari oleh aerosol yang ada di atmosfer bumi maka sebagian energi sinar matahari akan tersimpan di atmosfer dan berpotensi untuk memanaskan atmosfer bumi. Sementara itu, penghamburan radiasi matahari yang disebabkan oleh aerosol menyebabkan radiasi matahari terpantulbalikkan ke luar atmosfer bumi. Dampak aerosol secara langsung ini sangat bergantung pada sifat fisis aerosol tersebut dan disebut sebagai *single scattering albedo*, yaitu perbandingan antara radiasi yang dihamburkan dengan yang diserap oleh aerosol. Dalam hal ini, aerosol yang berukuran 0,1-1 μm (inti Aitken) merupakan partikel yang paling efektif dalam menghamburkan radiasi

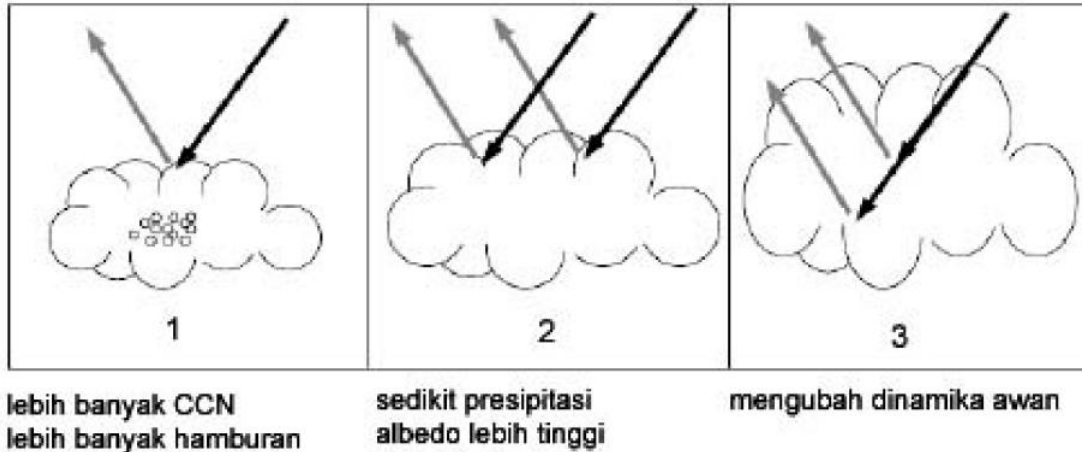
matahari sehingga memegang peranan penting dalam iklim global. Karena ukurannya yang sangat kecil dan memiliki bobot yang sangat ringan maka inti Aitken berpotensi untuk ditemukan pada ketinggian yang sangat tinggi (lapisan stratosfer).

Sebagai gambaran, aerosol yang bersumber dari letusan Gunung Pinatubo pada tahun 1991 berdampak langsung pada menurunnya 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 Chichon pada tahun 1982. Sementara itu, pada bulan September 1992 temperatur troposfer bawah global dan pada troposfer telah mengalami penurunan (*global cooling*) 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 B.J. et al., 2002).

3.2 Dampak Tidak Langsung

Selain berdampak langsung terhadap iklim, aerosol juga memberikan dampak tidak langsung. Dampak tidak langsung aerosol dapat didefinisikan sebagai proses-proses yang disebabkan oleh aerosol dan berdampak pada gangguan keseimbangan radiasi atmosfer bumi dengan cara memodulasi albedo awan ataupun jumlah awan, yaitu bertindak sebagai inti kondensasi awan (CCN: *cloud condensation nuclei*) dan inti es (IN: *ice nuclei*). Adanya aerosol yang tersuspensi ke dalam awan akan menyebabkan semakin banyaknya inti awan (CN: *cloud nuclei*) sehingga albedo awan menjadi meningkat dan waktu hidup awan juga menjadi lebih lama. Hal ini dapat menyebabkan berkurangnya jumlah curah hujan.

Efek Tak-langsung



Gambar 3-1: Dampak tidak langsung aerosol terhadap iklim global adalah dengan cara memodifikasi sifat-sifat fisis awan

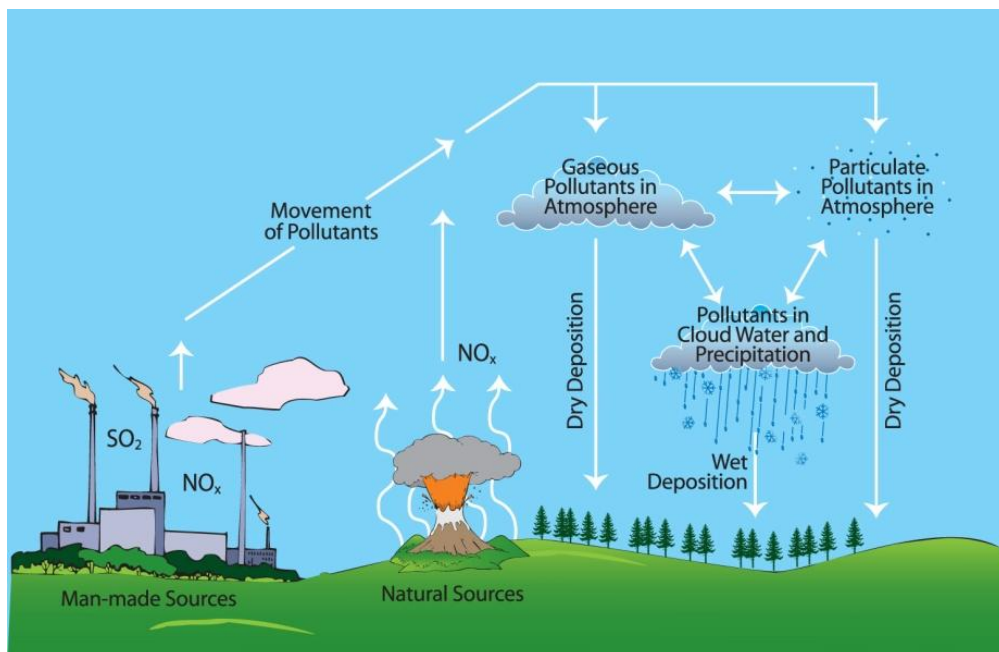
Dampak tidak langsung aerosol terhadap iklim lainnya adalah berkurangnya ukuran butiran awan (*cloud droplet*). Butiran awan yang terdapat di atas samudera atlantik memiliki ukuran yang lebih kecil untuk awan yang terpolusi dibandingkan dengan awan yang bersih (Breguier *et al.*, 2000; Schwartz *et al.*, 2002). Pengamatan jangka panjang menggunakan satelit untuk daerah China dan Eropa menunjukkan dampak tidak langsung aerosol yaitu menurunkan *planetary albedo* yang dapat dihubungkan dengan penyerapan aerosol pada musim dingin (Krüger and Graßl, 2002, 2004; Krüger *et al.*, 2004). Dengan demikian maka butiran awan yang lebih kecil akan mengurangi efisiensi presipitasi dan sekaligus menambah waktu hidup awan dan reflektivitasnya.

4 DAMPAK AEROSOL TERHADAP HUJAN ASAM

Aerosol yang berada di lapisan troposfer, akan terdeposisi ke permukaan bumi melalui proses deposisi basah dan kering. Deposisi basah terjadi jika aerosol terlarut ke dalam air hujan dan turun bersama-sama dengan hujan. Sebaliknya, deposisi kering terjadi melalui proses pengendapan yang tidak melibatkan kejadian hujan. Jika aerosol yang terlarut ke dalam air hujan

merupakan senyawa yang bersifat asam (misalnya turunan dari SO_2 dan NO_x) maka pH air hujan akan mengarah kepada pH yang bersifat asam. Dalam hal ini, kemampuan tanah dalam menetralkan senyawa yang bersifat asam akan sangat menentukan kelestarian lingkungan hidup. Tanah yang bersifat asam cenderung akan kehilangan zat gizi yang dibutuhkan oleh tetumbuhan yang akhirnya akan menurunkan jumlah tetumbuhan yang dapat tumbuh. Tentu saja ini akan mengganggu keseimbangan alam.

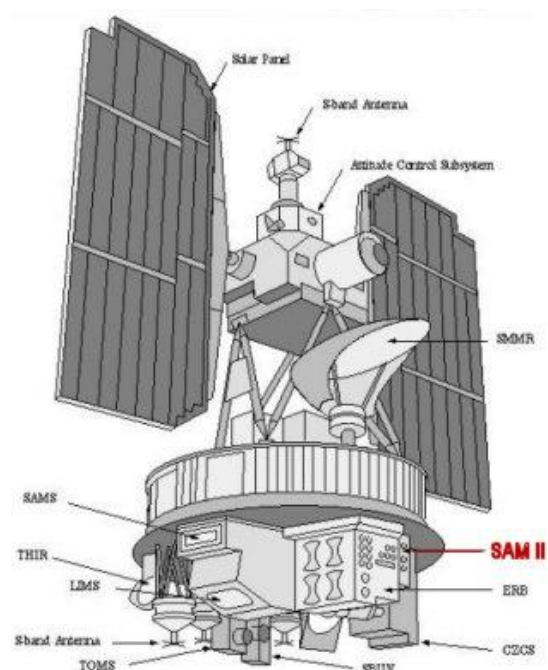
Efek hujan asam berbeda-beda terhadap lokasi. Rusaknya permukaan dedaunan ataupun batang pohon akan menurunkan kemampuannya dalam beradaptasi dengan iklim yang ekstrim (panas atau hujan) dan juga mempengaruhi kesuburannya. Hutan-hutan dataran tinggi sangat mudah terkena serangan penyakit karena mereka dikelilingi oleh awan ataupun kabut yang bersifat lebih asam. Tetumbuhan juga menderita karena pengaruh hujan asam terhadap tanah. Kontaminasi hujan asam yang berlebihan pada tanah akan cenderung menghilangkan zat gizi yang penting, dan ini akan menurunkan kandungan aluminium di dalam tanah. Kekurangan senyawa aluminium menyebabkan pertumbuhan tumbuhan menjadi lebih lambat atau bahkan mati sama sekali.



Gambar 4-1: Proses deposisi basah dan kering yang mencuci atmosfer dari senyawa-senyawa aerosol yang bersifat asam

5 DAMPAK AEROSOL TERHADAP PENIPISAN LAPISAN OZON

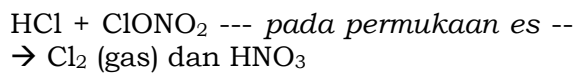
Pemantauan aerosol stratosfer secara rutin dilakukan sejak Oktober 1978 menggunakan sensor *Stratospheric Aerosol Measurement II* (SAM II) yang ditumpangkan pada Satelit NIMBUS 7. Proyek penelitian ini mengarahkan kepada penemuan PSCs dan diketahui bahwa PSCs ini memiliki siklus musiman di kedua belahan kutub dunia. Sifat-sifat PSCs ini diketahui dari pengamatan menggunakan sensor tersebut. Diketahui bahwa koefisien peluruhan (*extinction*) PSCs berkisar antara $10^{-3}/\text{km}$ hingga $10^{-2}/\text{km}$. meskipun tidak ditemukan awan dengan koefisien ekstingsi yang lebih besar daripada $10^{-2}/\text{km}$ namun ada indikasi bahwa hampir sebagian besar awan memiliki indikasi *optical depth*. Ini penting karena meskipun suhu di stratosfer mencapai -80°C hingga -85°C , namun air murni akan terkondensasi (dengan asumsi bahwa kandungan air 5 ppmv). Jika setiap partikel aerosol stratosfer ambient menjadi tetes awan (*water cloud droplet*) maka awan akan terkomposisikan dari tetes dengan jejari 2-3 mikron dan awan akan memiliki ekstingsi yang lebih besar daripada $10^{-1}/\text{km}$.



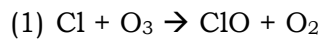
Gambar 5-1: NIMBUS 7 dan SAM II yang menempel (<http://sage.nasa.gov/SAM/>)

Polar Stratospheric Clouds (PSCs) merupakan awan stratosfer yang tersusun atas larutan asam nitrit dengan sejumlah kecil HCl dan H_2SO_4 . PSCs dapat juga terkomposisi dari campuran bahan-bahan kimia yang lainnya, terutama N_2O_5 , ClO, dan ClNO_3 , dan merupakan unsur penting dalam peristiwa terjadinya lubang ozon. PSCs memiliki efek yang tidak baik terhadap

ozon, yaitu (i) memisahkan oksida nitrat (misalnya asam nitrit, NO_2) yang dapat bereaksi dengan klorin monoksida (ClO) untuk membentuk klorin nitrat (ClONO_2), dan (ii) bertindak sebagai tempat terjadinya reaksi fase gas yang lambat menjadi sangat cepat secara heterogen (gas yang bereaksi pada permukaan benda padat). Efek yang kedua ini dapat digambarkan sebagai berikut,



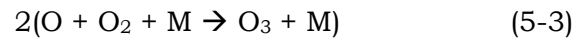
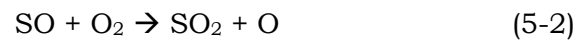
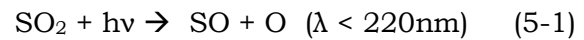
Reaksi tersebut dapat berlangsung secara cepat pada permukaan butiran awan cirrus stratosfer yang berwujud kristal. Adanya SO_2 di dalam butiran awan akan mengubah sifat optis awan sehingga berwujud sebagai kristal es pada lapisan stratosfer. Selanjutnya, klorin akan mempercepat proses perusakan ozon melalui reaksi sebagai berikut.



Hasil dari rangkaian reaksi tersebut adalah $\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow 2\text{O}_2$, yaitu berubahnya satu molekul ozon menjadi 2 molekul oksigen akibat adanya senyawa klorin.

SO_2 gunung berapi dapat mengurangi lapisan ozon dengan cara menyerap radiasi matahari pada panjang gelombang 180 – 390 nm, yaitu panjang gelombang yang bersesuaian dengan proses fotolisis O_2 (diperlukan saat pembentukan molekul ozon). Karena terjadi pengurangan proses fotolisis maka berakibat juga pada berkurangnya proses pembentukan ozon. Selain mengurangi proses pembentukan molekul ozon, SO_2 juga dapat menambah konsentrasi ozon stratosfer, yaitu dengan cara menyerap radiasi ultraviolet matahari untuk menghasilkan *precursor*

ozon (atom O). Dengan kata lain, SO_2 mengkatalisis proses pembentukan ozon, seperti ditunjukkan pada persamaan reaksi berikut ini:



Pada panjang gelombang kurang dari 220 nm, SO_2 akan terurai menjadi satu molekul SO dan satu atom O yang bersifat tidak stabil. Molekul SO kemudian akan bereaksi dengan molekul oksigen lainnya untuk menghasilkan molekul SO_2 kembali dan satu atom O. Selanjutnya atom oksigen dan molekul oksigen akan bergabung kembali menjadi molekul O_3 . Akhirnya, dengan bantuan molekul SO_2 dan radiasi matahari ($\lambda < 220\text{nm}$) maka 3 molekul oksigen akan diubah menjadi 2 molekul ozon pada lapisan stratosfer.

6 PENUTUP

Aerosol stratosfer memiliki peran yang sangat kuat dalam proses terjadinya perubahan iklim. Dampak langsung yang berkaitan dengan radiasi matahari adalah terjadinya pendinginan global atau *global cooling*, dan dampak tak langsungnya adalah berkurangnya intensitas hujan (curah hujan) karena berubahnya sifat-sifat fisika awan. Berubahnya sifat fisika awan bisa terjadi dengan semakin mengecilnya diameter butiran awan, ataupun berubahnya titik leleh dan titik beku awan.

Di lapisan troposfer dan permukaan, aerosol sulfat banyak dihasilkan dari aktivitas manusia khususnya dalam pemakaian bahan bakar fosil. Melalui deposisi basah maka aerosol sulfat akan terlarut ke dalam air hujan

dan jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk hujan asam. Hujan yang bersifat asam tentu saja akan mengganggu keseimbangan lingkungan. Dampak langsung hujan asam terhadap tumbuhan adalah menyebabkan tumbuhan menjadi kering dan selanjutnya mati, sedangkan dampak jangka panjangnya adalah mengurangi tingkat kesuburan tanah sehingga mengganggu pertumbuhan tanaman.

SO₂ yang dihasilkan dari letusan gunung berapi dapat berperan sebagai penghambat proses pembentukan ozon di stratosfer dengan cara menyerap radiasi matahari (λ 180-390 nm) sehingga mengurangi proses fotolisis yang diperlukan dalam pembentukan ozon, dan secara bersamaan dapat pula mengkatalisis proses pembentukan ozon dengan cara menyerap radiasi matahari lainnya ($\lambda < 220$ nm).

DAFTAR RUJUKAN

- Breguier, J.L.; Pawlowska, H.; Schuller, L.; Preusker, R.; Fischer, J.; and Fouquart, Y., 2000. *Radiative Properties of Boundary Layerclouds: Droplet Effective Radius Versus Number Concentration*, J. Atmos. Sci., 57, 803-821.
- Chýlek, P.; G.B. Lesins; G. Videen; J.G.D. Wong; R.G. Pinnick; D. Ngo; J.D. Klett, 1996. *Black Carbon and Absorption of Solar Radiation By Clouds*. J. Geophys. Res., 101, 23 365–23 371.
- Dutton, E.G.; J.R. Christy, 1992. *Solar Radiative Forcing at Selected Locations and Evidence for Global Lower Tropospheric Cooling Following the Eruptions of El Chichón and Pinatubo*. Geophysical Research Letters, Volume 19, p. 2313-2316.
- Kumar, P; A. Robins; S. Vardoulakis; R. Britter, 2010. *A Review of the Characteristics of Nanoparticles in the Urban Atmosphere and the Prospects for Developing Regulatory Controls*. Atmospheric Environment, 44.
- Krüger, O.; Graßl, H., 2002. *The Indirect Aerosol Effect Over Europe*. Geophys. Res. Lett., 29.
- Krüger, O.; Graßl, H., 2004. *Albedo Reduction by Absorbing Aerosols Over China*". Geophys. Res. Lett.
- Krüger, O.; R. Marks; H. Graßl, 2004. *Influence of Pollution on Cloud Reflectance*. J. Geophys. Res., 109.
- Lohmann, U.; J. Feichter, 2005. *Global Indirect Aerosol Effects: a Review*. Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 715-737.
- McCormick, M.P.; L.W. Thomason; C.R. Trepte, 1995. *Atmospheric Effects of the Mt Pinatubo Eruption*. Nature, 373, 399-404.
- McElroy, M.B.; R.J. Salawitch; S.C. Wofsy; J.A. Logan, 1986. *Reduction of Antarctic Ozone Due to Synergistic Interactions of Chloride And Bromine*. Nature, 321, 759-762.
- Schwartz, S. E.; Harshvardhan; Benkovitz, C., 2002. *Influence of Anthropogenic Aerosol on Cloud Optical Depth and Albedo Shown by Satellite Measurements and Chemical Transport Modeling*. Proc. Nat. Acad. Sciences, 99, 1784–1789.
- 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, 727-730.
- Solomon, S.; R. R. Garcia; F. S. Rowland; D. J. Wuebbles, 1986. *On The Depletion of Antarctic Ozone*. Nature, 321, 755–758.
- Warneck, P., 1988. *Chemistry of the Natural Atmosphere*. San Diego Academic Press.
- Wikipedia, 2013. http://en.wikipedia.org/wiki/Mount_Pinatubo, diunduh pada tanggal 21 Juni 2013 pukul 10:10 WIB.

