

Kajian Mikrofisis Awan Berbasis Satelit pada Kejadian Erupsi Vulkanik Menggunakan Data Himawari-9 (Studi Kasus Erupsi Gunung Lewotobi 12 November 2024)

David Karunia Sianturi¹, Muhammad Nur Hasan Wirangi^{1*}, Satria Mahawira Adhi Pradana¹

¹Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)

DOI: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i4.784>

Article Info

Received: 25 January 2025

Revised: 04 December 2025

Accepted: 05 December 2025

Correspondence:

Phone: +6281318109766

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk memahami dampak erupsi Gunung Lewotobi pada karakteristik mikrofisis awan menggunakan data satelit Himawari-9. Erupsi vulkanik dapat meningkatkan konsentrasi aerosol di atmosfer yang berperan sebagai inti kondensasi awan dan dapat memengaruhi sifat-sifat awan. Dalam studi ini, data yang dianalisis mencakup ketebalan optik awan (COT), radius efektif awan (CER), jumlah tetesan awan (CDNC) pada periode sebelum dan saat kejadian erupsi. Sebaran abu vulkanik dianalisis menggunakan metode RGB, yang menunjukkan penyebaran abu ke arah barat dari gunung. Hasil penelitian menunjukkan penambahan konsentrasi aerosol tidak memberi pengaruh signifikan terhadap reflektivitas awan. Kejadian erupsi berefek pada perubahan mikrofisis awan dengan adanya peningkatan jumlah tetes awan dan penurunan radius efektif. Temuan ini memberikan wawasan terkait dampak erupsi vulkanik terhadap karakteristik mikrofisis awan terutama di wilayah Indonesia.

Keywords: erupsi vulkanik, mikrofisis awan, aerosol, Himawari-9, Gunung Lewotobi

Citation: Sianturi, K., D., Wirangi, H., N., M., & Pradana, A., M., S. (2025). Kajian Mikrofisis Awan Berbasis Satelit pada Kejadian Erupsi Vulkanik Menggunakan Data Himawari-9 (Studi Kasus Erupsi Gunung Lewotobi 12 November 2024). *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(4), 2401-2406. doi: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i4.784>

Pendahuluan

Atmosfer bumi melalui proses yang dinamis berperan sebagai tempat terjadinya berbagai fenomena cuaca termasuk sistem perawan. Kondisi atmosfer dapat mempengaruhi karakteristik dan pertumbuhan awan melalui berbagai aspek seperti tingkat kestabilan atmosfer dan komposisi penyusun lapisannya. Kandungan aerosol di atmosfer menjadi salah satu variabel yang mempengaruhi perkembangan sel awan khususnya melalui efek tidak langsung pada pembentukan tetes awan (Susanti dkk., 2018). Konsentrasi aerosol tersebut dapat meningkat akibat berbagai faktor seperti kebakaran hutan, aktivitas antropogenik, serta erupsi vulkanik.

Aerosol sebagai partikel tersuspensi di atmosfer dapat berdampak langsung pada pertumbuhan awan melalui penyerapan radiasi matahari sehingga menyebabkan butiran awan menguap akibat atmosfer yang memanas (Sekiguchi dkk., 2003). Di sisi lain, pengkajian mengenai efek tidak langsung juga telah banyak dilakukan berkaitan dengan interaksi yang ditimbulkan terhadap tetes awan dan mikrofisisnya (Wall dkk., 2023; Christensen dkk., 2016; Lohmann & Feichter, 2005). Aerosol yang bertindak sebagai inti kondensasi dapat mempengaruhi karakteristik dari pertumbuhan awan. Tetes awan akan mengalami yang disebut efek Twomey yang merujuk pada peningkatan reflektivitas serta albedo awan karena butir awan yang

Email: hasanwirangi@gmail.com

menjadi lebih kecil dengan populasi yang meningkat akibat tingginya konsentrasi partikel aerosol (Twomey, 1977). Butir awan yang kecil tetapi banyak tersebut dapat menurunkan kemungkinan presipitasi namun memperpanjang masa hidup dari awan tersebut (Lohmann & Feichter, 2005; Ramanathan & Carmichael, 2008). Sementara itu, penelitian lain oleh Jiang dkk. (2018) menunjukkan bahwa aerosol dapat meningkatkan maupun menghambat pertumbuhan awan bergantung pada jenis aerosol, konsentrasi, dan kondisi atmosfer setempat.

Erupsi gunung berapi dapat meningkatkan konsentrasi aerosol dengan abu vulkanik yang dihasilkan. Hubungan mengenai erupsi vulkanik dengan perkembangan mikrofisis awan telah banyak diteliti sebelumnya. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Breen, dkk. (2021) ditemukan adanya perubahan signifikan terutama berkaitan dengan ukuran dan populasi butiran awan. Pada beberapa kasus, efek Twomey ditemukan dengan adanya penurunan radius efektif dan bertambahnya jumlah tetes awan seiring dengan peningkatan reflektivitas (Malavelle dkk., 2017; McCoy & Hartmann, 2015). Partikel asam sulfat sebagai aerosol yang banyak terbentuk saat kejadian erupsi sejatinya bersifat higroskopis sehingga cukup efisien untuk menjadi inti kondensasi awan serta memudahkan terjadinya tahap kondensasi awal (Martucci dkk., 2012). Namun, pengoptimalan ukuran tetesan yang terbentuk juga dipengaruhi oleh tingginya konsentrasi aerosol sehingga perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai dampak dari erupsi vulkanik terhadap pertumbuhan tetes awan.

Pada penelitian ini, dengan menggunakan data citra satelit Himawari-9 akan dilakukan pengkajian mengenai karakteristik dan mikrofisis awan pada periode sebelum dan selama kejadian erupsi gunung Lewotobi. Fokus analisis diterapkan pada data observasi empiris yang mencakup informasi tentang mikrofisis awan, seperti *cloud optical thickness*, *cloud effective radius*, dan *cloud droplet number concentration*. Data tersebut digunakan untuk mengestimasi jumlah konsentrasi tetes awan yang terbentuk saat dan sebelum kejadian erupsi gunung berapi. Penelitian ini bertujuan untuk menelaah dampak dari letusan gunung terhadap variabel mikrofisis awan khususnya pada lingkup kejadian di wilayah Indonesia..

Metode

Penelitian ini berfokus pada area sekitar Gunung Lewotobi di Nusa Tenggara Timur dengan domain penelitian diambil pada rentang koordinat 8° LS - 9° LS dan 122° BT - 123° BT seperti ditunjukkan pada

Gambar 1. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada status Gunung Lewotobi sebagai salah satu gunung berapi aktif di Indonesia. Penelitian ini dilakukan pada dua periode utama, yaitu sebelum letusan Gunung Lewotobi pada tanggal 12 Oktober 2024 dan saat letusan pada tanggal 12 November 2024. Data dari kedua periode tersebut dianalisis untuk memahami perubahan kondisi atmosfer, seperti pola distribusi aerosol, radiasi, serta interaksi aerosol-awan dan radiasi, yang berkaitan dengan aktivitas vulkanik.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di sekitar Gunung Lewotobi, Nusa Tenggara Timur

Pengambilan data level 2 dari JAXA Himawari Monitor dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai properti awan (*cloud property*). Data yang digunakan berupa file berformat NetCDF yang memiliki resolusi temporal sebesar 10 menit dan resolusi spasial sebesar 5 kilometer, dengan jumlah piksel 2401 dan garis 2401. Dalam penelitian ini, variabel yang dianalisis meliputi ketebalan optik awan (*cloud optical thickness*, COT), radius efektif awan (*cloud effective radius*, CER), dan konsentrasi jumlah tetesan awan (*cloud droplet number concentration*, CDNC). Resolusi temporal yang tinggi dari satelit Himawari memungkinkan pemilihan waktu yang lebih baik untuk mengamati perubahan sifat awan.

Untuk mengetahui arah sebaran abu vulkanik, pemetaan dilakukan menggunakan citra satelit Himawari-8 dengan metode RGB. Teknik ini memanfaatkan beberapa kanal untuk memisahkan warna dasar merah, hijau dan biru. Warna dasar merah didapat menggunakan *brightness temperature difference* (BTD) dari kanal 10.4 μm dikurangi kanal 12.4 μm . BTD yang dihitung dari kanal 3.9 μm dikurangi

kanal 10.4 μm sebagai warna dasar hijau dan *brightness temperature* (BT) kanal 3.9 μm sebagai warna dasar biru.

Pada penelitian sebelumnya, ditunjukkan bahwa peningkatan aerosol dapat meningkatkan albedo awan dengan memperbanyak tetes awan yang lebih kecil yang disebut dengan efek Twomey (Twomey, 1977). Untuk mengestimasi konsentrasi jumlah tetes awan (*cloud droplet number concentration*, CDNC) yang dinyatakan pada **Persamaan 1**, metode didasarkan pada hubungan antara sifat optik *bulk* awan, parameter mikrofisis awan dan parameter kondisi atmosfer pada wilayah penelitian (C). Parameter optik *bulk* yang digunakan adalah *cloud optical thickness* (τ), sedangkan parameter mikrofisis awan adalah radius efektif tetes awan (r_{eff}) (Krisna dkk., 2021).

$$CDNC = C \frac{\tau^{1/2}}{r_{eff}^{5/2}} \tag{1}$$

Untuk mempermudah perhitungan maka asumsi bahwa C=1 dalam rumus untuk menghitung konsentrasi jumlah tetes awan (CDNC) dilakukan dengan alasan bahwa wilayah penelitian berada pada lokasi yang sama dan rentang waktu yang diambil relatif tidak terlalu lama yang dinyatakan dalam **Persamaan 2**.

$$CDNC \approx \frac{\tau^{1/2}}{r_{eff}^2} \tag{2}$$

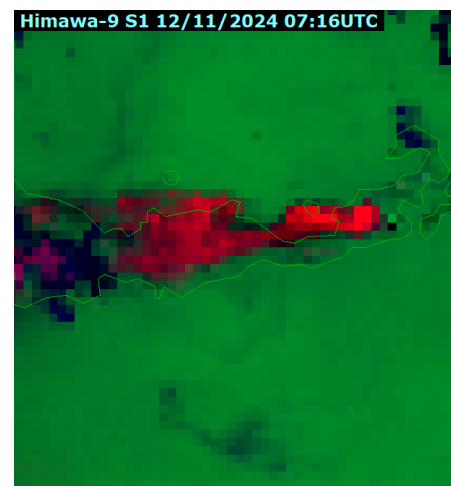
Nilai COT, CER, dan CDNC diambil sampel pada kejadian sebelum dan saat letusan. Variabel yang dipengaruhi aktivitas vulkanik diidentifikasi melalui pola temporal dalam analisis ini. Selain itu, untuk memahami hubungan statistik antara radius antar variabel awan, regresi linear dilakukan antara radius efektif dan nilai konsentrasi tetes. Penelitian sebelumnya oleh Susanti dkk. (2014) telah menunjukkan korelasi antara aerosol dengan ukuran radius efektif untuk awan es di Indonesia, dengan variasi korelasi yang berbeda-beda tergantung pada periode musim.

Hasil analisis kemudian divalidasi dengan membandingkannya terhadap penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa pengaruh positif aerosol adalah menurunnya ukuran partikel awan sebagai awan tinggi (Susanti dkk., 2014). Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa letusan gunung berapi dapat mempengaruhi sifat optis awan melalui penyebaran aerosol vulkanik yang meningkatkan reflektivitasnya, yang dikenal sebagai efek albedo awan (Jonathan dkk., 2021). Dampak aerosol secara tidak langsung adalah dengan cara memodifikasi sifat optis awan.

Hasil dan Pembahasan

1. Daerah sebaran abu vulkanik

Sebaran abu vulkanik akibat erupsi gunung Lewotobi dideteksi menggunakan metode RGB. Hasil pengolahan citra menunjukkan terdapat adanya persebaran abu vulkanik ke arah barat dari sumber erupsi, diindikasikan oleh area berwarna merah seperti ditampilkan pada **Gambar 2**. Warna merah yang pekat menandakan konsentrasi abu vulkanik yang cukup tinggi. Keluaran ini menjadi verifikator variabel lain bahwa terdapat indikasi adanya persebaran abu vulkanik yang berpotensi meningkatkan konsentrasi aerosol pada daerah terdampak.

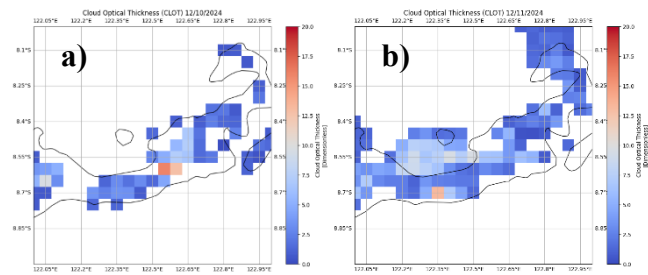


Gambar 2. Daerah sebaran abu vulkanik Gunung Lewotobi dengan metode RGB

2. *Cloud Optical Thickness* (CLOT)

Gambar 3 merepresentasikan distribusi spasial dari variabel COT pada daerah sekitar Gunung Lewotobi yang menunjukkan sebaran nilai reflektivitas awan terhadap radiasi matahari. Variabel ini menjadi indikator hubungan antara ukuran dengan populasi tetesan awan. Nilai ini dipengaruhi oleh radius efektif dan jumlah tetesan awan.

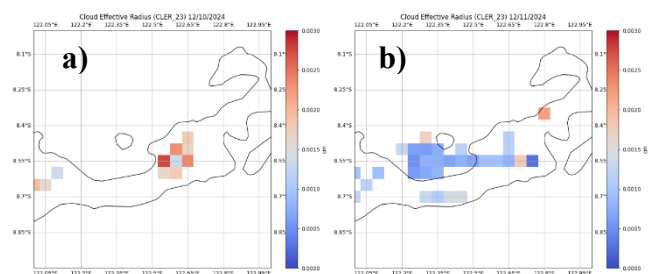
Hasil pengolahan data distribusi nilai *Cloud Optical Thickness* (COT) sebelum dan saat terjadinya erupsi menunjukkan bahwa kondisi nilai cenderung konstan dengan tidak adanya perbedaan nilai yang signifikan. Analisis ini didasarkan pada tinjauan spasial yang mencakup berbagai area terdampak erupsi yang menampilkan distribusi nilai COT relatif seragam tanpa perubahan yang mencolok. Hal ini mengindikasikan bahwa proses erupsi tidak banyak berdampak pada nilai COT.



Gambar 3. Peta sebaran nilai COT pada wilayah sekitar Gunung Lewotobi; (a) sebelum kejadian erupsi, (b) saat kejadian erupsi

3. *Cloud Effective Radius (CER)*

Hasil visualisasi yang ditampilkan pada **Gambar 4** menggambarkan radius efektif awan yang merepresentasikan ukuran rata-rata tetesan air di dalam awan. Ukuran efektif tersebut dihitung berdasarkan distribusi ukuran tetesan air berkaitan dengan karakteristik mikrofisis awan. Pertumbuhan radius tetesan dapat dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi dan jenis aerosol yang terkandung di atmosfer.



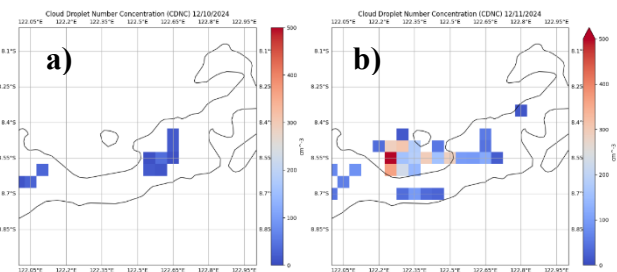
Gambar 4. Peta sebaran nilai CER pada wilayah sekitar Gunung Lewotobi; (a) sebelum kejadian erupsi, (b) saat kejadian erupsi

Berdasarkan gambar terlihat adanya penurunan ukuran rata-rata tetesan awan pada kondisi sebelum dan saat erupsi. Radius tetesan sebelum kejadian teramati secara sebaran memiliki ukuran yang relatif lebih besar dibandingkan saat fenomena erupsi terjadi, ditunjukkan oleh area berwarna merah yang lebih dominan. Sebaliknya, sebaran area berwarna biru lebih merata secara spasial pada saat erupsi. Hal tersebut menunjukkan terdapat penurunan nilai ukuran rata-rata tetesan yang terbentuk dan dapat menjadi indikasi adanya perubahan dalam proses mikrofisis awan akibat sebaran abu vulkanik.

4. *Cloud Droplet Number Concentration (CDNC)*

CDNC merupakan data banyaknya tetesan awan yang berada per satuan luas (cm^{-3}) yang distribusi secara spasialnya ditunjukkan oleh **Gambar 5**.

Konsentrasi partikel aerosol dapat mempengaruhi jumlah tetes awan. Semakin banyak aerosol, semakin tinggi kemungkinan terbentuknya tetesan awan. Semakin tinggi nilai CDNC, kemungkinan tetes awan dapat bertumbuh menjadi besar akan semakin kecil karena bertambahnya kompetisi antar tetesan untuk menarik partikel uap air di atmosfer.



Gambar 5. Peta sebaran nilai CDNC pada wilayah sekitar Gunung Lewotobi; (a) sebelum kejadian erupsi, (b) saat kejadian erupsi

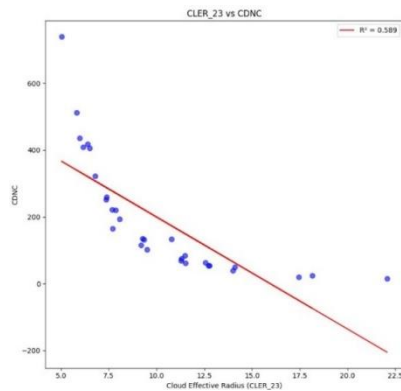
Hasil pengolahan data *cloud droplet number concentration* (CDNC) menunjukkan adanya peningkatan jumlah tetesan awan saat terjadinya erupsi. Sebelum erupsi, populasi tetesan awan yang terbentuk relatif sedikit, terlihat dari dominasi warna biru tua pada peta distribusi CDNC. Hal tersebut menunjukkan bahwa hanya terdapat sedikit partikel aerosol yang dapat mengondensasi uap air menjadi tetesan awan. Namun, setelah kejadian erupsi jumlah tetesan awan meningkat secara signifikan. Hal ini terlihat dari meluasnya area dengan warna yang lebih terang, mulai dari biru muda hingga merah. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa erupsi menghasilkan banyak partikel aerosol yang menjadi inti kondensasi, memungkinkan lebih banyak uap air mengembun dan meningkatkan populasi tetesan awan.

5. *Korelasi CDNC dan CER*

Korelasi antara CDNC dengan CER penting karena keduanya mempengaruhi sifat fisis awan. Nilai CDNC tinggi berkaitan dengan banyaknya tetesan awan yang lebih kecil, sementara CDNC rendah menunjukkan populasi tetesan yang lebih sedikit sehingga terdapat probabilitas lebih tinggi untuk tetesan tumbuh menjadi lebih besar akibat proses difusi dan penggabungan dalam tetes awan yang lebih mudah terjadi.

Gambar 6 menampilkan hasil *scatter plot* antara *cloud effective radius* (CER) dan *cloud droplet number concentration* (CDNC) dengan sumbu horizontal (x) menyatakan nilai CER dan sumbu vertikal (y) mewakili nilai CDNC. Regresi linear menunjukkan adanya

korelasi negatif antara CER dan CDNC. Dari grafik dapat diamati bahwa seiring bertambahnya CDNC, nilai ukuran tetesan awan akan semakin mengecil. Nilai koefisien determinasi (R^2) dari regresi ini adalah 0.589, menjelaskan bahwa 58.9% perubahan ukuran tetesan awan dipengaruhi oleh banyaknya tetesan atau inti kondensasi awan.



Gambar 6. Scatter plot korelasi CDNC dan CER

Nilai korelasi negatif ini sesuai dengan hasil nilai COT, CER dan CDNC yang didapatkan sebelumnya. Dengan mengacu pada **Persamaan 2**, nilai reflektivitas yang konstan menyebabkan nilai radius efektif dan jumlah tetes awan berbanding terbalik. Hal tersebut menjelaskan bahwa penurunan populasi tetes awan akibat penambahan konsentrasi aerosol dapat berpengaruh pada pertumbuhan tetesan untuk dapat mencapai ukuran yang lebih besar.

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa abu vulkanik hasil erupsi Gunung Lewotobi pada 12 November 2024 mempengaruhi karakteristik mikrofisis awan wilayah sekitarnya berkaitan dengan ukuran dan jumlah tetesan awan, tetapi tidak memberi dampak signifikan pada nilai reflektivitas awan. Nilai COT yang cenderung konstan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan seiring penambahan jumlah aerosol, nilai reflektivitas awan relatif tidak berubah (Krisna dkk., 2021). Pada penelitian ini, abu vulkanik erupsi Gunung Lewotobi memberikan respons yang serupa.

Peningkatan konsentrasi aerosol akibat erupsi menyebabkan ukuran rata-rata tetes awan yang terbentuk menjadi lebih kecil, tetapi dalam jumlah yang lebih banyak secara populasi. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan nilai radius efektif dan peningkatan nilai konsentrasi tetesan. Hasil korelasi negatif dari nilai CER dan CDNC juga mengindikasikan hubungan

saling berpengaruh yang berbanding terbalik antara dua variabel tersebut. Temuan ini relevan dengan beberapa kajian terdahulu yang menunjukkan penambahan aerosol pada kejadian erupsi gunung berapi memudahkan tetes awan untuk mulai mengembun dengan bertambahnya jumlah inti kondensasi (Malavelle dkk., 2017; McCoy & Hartmann, 2015). Namun, hal tersebut berdampak pada lebih tingginya kompetisi untuk tetes awan tersebut bertumbuh.

Daftar Pustaka

- Breen, K. H., Barahona, D., Yuan, T., Bian, H., & James, S. C. (2021). Effect of volcanic emissions on clouds during the 2008 and 2018 Kilauea degassing events. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 7749–7771. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7749-2021>
- Christensen, M. W., Chen, Y. C., & Stephens, G. L. (2016). Aerosol indirect effect dictated by liquid clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(24), 14–636. <https://doi.org/10.1002/2016JD025245>
- Jiang, J. H., Su, H., Huang, L., Wang, Y., Massie, S., Zhao, B., Omar, A., & Wang, Z. (2018). Contrasting effects on deep convective clouds by different types of aerosols. *Nature Communications*, 9(1), 3874. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06280-4>
- Jonathan, I. S., Sukarasa, I. K., & Wirata, I. W. (2021). Analisis sebaran debu vulkanik erupsi Gunung Agung 2018 dan pengaruhnya terhadap suhu permukaan darat wilayah Bali dengan menggunakan metode split windows. *Buletin Fisika*, 22(2), 112–118.
- Krisna, T. C., Hayati, N., & Hariyanto, T. (2021). Remote sensing of droplet number concentration of aerosol-induced clouds during the 2019 fire event in Borneo, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 731(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/731/1/012016>
- Lohmann, U., & Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: A review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(3), 715–737. <https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005>
- Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Jones, A., Gettelman, A., Clarisse, L., Bauduin, S., & Thordarson, T.

- (2017). Strong constraints on aerosol–cloud interactions from volcanic eruptions. *Nature*, 546(7659), 485–491.
<https://doi.org/10.1038/nature22974>
- Martucci, G., Ovadnevaite, J., Ceburnis, D., Berresheim, H., Varghese, S., Martin, D., & O'Dowd, C. D. (2012). Impact of volcanic ash plume aerosol on cloud microphysics. *Atmospheric Environment*, 48, 205–218.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.033>
- McCoy, D. T., & Hartmann, D. L. (2015). Observations of a substantial cloud-aerosol indirect effect during the 2014–2015 Bárðarbunga–Veidivötn fissure eruption in Iceland. *Geophysical Research Letters*, 42(23), 10,409–10,417.
<https://doi.org/10.1002/2015GL067070>
- Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, 1(4), 221–227.
<https://doi.org/10.1038/ngeo156>
- Sekiguchi, M., Nakajima, T., Suzuki, K., Kawamoto, K., Higurashi, A., Rosenfeld, D., Sano, I., & Mukai, S. (2003). A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosol and cloud parameters. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22).
<https://doi.org/10.1029/2002JD003359>
- Susanti, I., Tursilowati, L., & Cholianawati, N. (2014). Analisis pengaruh aerosol pada awan di Indonesia [Aerosol impact on clouds analysis over Indonesia]. *Jurnal Sains Dirgantara*, 12(1).
- Twomey, S. (1977). The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(7), 1149–1152.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2)
- Wall, C. J., Storelvmo, T., & Possner, A. (2023). Global observations of aerosol indirect effects from marine liquid clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(20), 13125–13141.
<https://doi.org/10.5194/acp-23-13125-2023>