

BAB I

PENDAHULUAN

Dinamika sistem Bumi merupakan aspek fundamental dalam studi kebumihan, mencakup interaksi kompleks antara litosfer, atmosfer, hidrosfer, dan biosfer. Indonesia, yang berada di zona Cincin Api Pasifik, memiliki kerentanan tinggi terhadap aktivitas vulkanik. Salah satu emisi utama dari letusan gunung api adalah gas sulfur dioksida (SO_2), yang di atmosfer dapat bereaksi membentuk aerosol sulfat. Partikel ini meningkatkan albedo atmosfer, menurunkan suhu permukaan, dan mengubah proses mikrofisika awan, sehingga berdampak pada pembentukan awan serta potensi penurunan curah hujan (Marshall dkk., 2022; Timmreck dkk., 2021).

Mengingat tingginya frekuensi erupsi di Indonesia dan kedekatannya dengan wilayah berpenduduk, penting untuk mengevaluasi respons atmosferik atau cuaca di daerah terdampak terhadap injeksi SO_2 . Penelitian ini secara khusus meninjau konsentrasi kolom SO_2 sebagai variabel independen, serta temperatur permukaan, konsentrasi aerosol sulfat (SO_4), ketebalan optik awan (Cloud Optical Thickness/COT), dan curah hujan harian sebagai parameter cuaca (variabel dependen) yang dipengaruhi. Analisis dilakukan berdasarkan studi kasus letusan Gunung Lewotobi tahun 2024, dengan fokus pada dinamika temporal dan keterkaitan antar variabel untuk mengidentifikasi pengaruh emisi vulkanik terhadap kondisi atmosfer lokal di wilayah Nusa Tenggara Timur.

1.1.Latar Belakang

Pada tanggal 3 November 2024, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) secara resmi meningkatkan status Gunung Lewotobi Laki-laki, yang terletak di Kabupaten Flores Timur, Nusa Tenggara Timur, ke Level IV (Awat). Kenaikan status ini menandai tingkat bahaya tertinggi dalam sistem peringatan aktivitas vulkanik di Indonesia dan mengindikasikan terjadinya peningkatan aktivitas vulkanik yang signifikan. Letusan eksplosif yang terjadi ditandai oleh lontaran material piroklastik berupa kerikil dan pasir hingga

mencapai pos pengamatan sejauh 8 kilometer dari kawah. Kolom erupsi yang terbentuk tercatat menjulang hingga ketinggian sekitar 8.000 meter di atas puncak kawah, dengan sebaran abu meluas hingga radius 10 kilometer ke arah barat daya hingga barat laut (Adi, 2024a). Sebaran abu vulkanik ini tidak hanya mengganggu visibilitas dan aktivitas masyarakat sekitar, tetapi juga berpotensi menimbulkan dampak klimatologis lokal akibat perubahan komposisi atmosfer.

Salah satu ciri penting dari erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki pada periode tersebut adalah emisi gas vulkanik, terutama sulfur dioksida (SO_2), dalam jumlah yang sangat besar. Berdasarkan data pemantauan satelit, tercatat bahwa pelepasan gas SO_2 dari kawah gunung ini mencapai lebih dari 10.000 ton per hari (Adi, 2024b). Kuantitas ini termasuk dalam kategori tinggi dalam skala global dan mencerminkan dinamika sistem magmatik yang sangat aktif. Gas SO_2 yang dilepaskan ke atmosfer dapat bereaksi dengan uap air membentuk aerosol sulfat (H_2SO_4), yang berperan penting dalam perubahan iklim lokal maupun global (Marshall dkk., 2022). Aerosol sulfat ini memiliki kemampuan untuk memodifikasi pembentukan awan, menghambat transmisi radiasi matahari ke permukaan bumi, dan menyebabkan fluktuasi suhu (Sahoo, 2024).

Dalam skala atmosfer, keberadaan aerosol sulfat dapat menimbulkan efek kompleks. Di satu sisi, partikel ini dapat menyerap dan memantulkan radiasi matahari, yang dalam jangka pendek dapat menyebabkan efek pemanasan di lapisan stratosfer. Namun, dalam jangka panjang, akumulasi aerosol sulfat justru berkontribusi terhadap pendinginan permukaan bumi akibat berkurangnya jumlah energi matahari yang mencapai permukaan (Timmreck dkk., 2021). Penyerapan radiasi inframerah oleh aerosol ini juga dapat mengganggu keseimbangan energi di atmosfer dan memicu gangguan sirkulasi udara regional. Studi oleh Paik dkk., (2023) menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi SO_2 dan aerosol sulfat di troposfer atas dapat menyebabkan ketidakseimbangan termal yang signifikan, menghasilkan turbulensi atmosfer, serta mengganggu pola cuaca lokal dan regional (Marshall dkk., 2020; Sellitto dkk., 2024).

Penting untuk dicatat bahwa wilayah Nusa Tenggara Timur merupakan daerah kepulauan dengan topografi kompleks dan dinamika atmosfer yang sangat sensitif terhadap perubahan komposisi atmosfer (Reid dkk., 2023). Gangguan seperti peningkatan konsentrasi SO_2 dan pembentukan aerosol sulfat dapat berinteraksi dengan kelembapan lokal, suhu permukaan laut, serta angin musiman. Studi kontekstual pada kawasan tropis menunjukkan bahwa aerosol terutama sulfat mempengaruhi pola monsun dan variabilitas presipitasi, berpotensi memperkuat hujan ekstrem (Z. Li dkk., 2016). Aerosol sulfat dengan kemampuannya memantulkan sinar matahari dan berperan sebagai inti kondensasi awan, telah terbukti mempertinggi reflektivitas awan dan menurunkan suhu permukaan efek yang bahkan dapat meningkatkan kepekaan sistem monsun terhadap perubahan iklim (Chen dkk., 2024). Dalam konteks tersebut, letusan Gunung Lewotobi Laki-laki menjadi studi yang sangat relevan untuk memahami korelasi antara aktivitas vulkanik dan parameter cuaca lokal.

Dampak aerosol vulkanik terhadap sistem iklim sebenarnya telah lama menjadi objek studi dalam ilmu kebumihantaran. Letusan besar seperti Gunung Pinatubo pada tahun 1991 telah membuktikan bahwa injeksi sulfur ke stratosfer dapat menyebabkan penurunan suhu global selama beberapa tahun (Robock, 2000). Namun, pengaruh serupa dalam skala lokal, terutama di daerah tropis dan kepulauan seperti Indonesia, masih belum banyak diteliti secara mendalam. Kompleksitas sistem atmosfer di wilayah tropis, yang dipengaruhi oleh fenomena musiman seperti monsun, El Niño–Southern Oscillation (ENSO) menjadikan dampak aktivitas vulkanik terhadap cuaca lokal sebagai suatu persoalan yang memerlukan pendekatan interdisipliner dan berbasis data.

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara ilmiah dan sistematis dampak erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki terhadap dinamika cuaca di wilayah sekitarnya. Fokus utama akan diarahkan pada analisis pelepasan SO_2 dalam jumlah besar serta pengaruhnya terhadap pembentukan awan, suhu udara, dan pola curah hujan. Dengan memanfaatkan data satelit serta pendekatan geofisika atmosfer, diharapkan

penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam memahami mekanisme interaksi antara sistem vulkanik dan sistem cuaca, terutama dalam konteks Indonesia sebagai negara yang berada di jalur cincin api Pasifik.

Lebih lanjut, hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan masukan ilmiah yang berguna dalam upaya mitigasi bencana berbasis sains. Mengingat bahwa masyarakat di sekitar Gunung Lewotobi Laki-laki sebagian besar bermukim di wilayah rawan erupsi dan tergantung pada sistem pertanian yang sangat sensitif terhadap perubahan cuaca, pemahaman tentang hubungan antara letusan dan anomali cuaca akan sangat penting dalam merancang strategi tanggap darurat, sistem peringatan dini, serta pengelolaan risiko bencana secara lebih efektif dan terukur.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, maka diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana interaksi emisi sulfur dioksida (SO_2) dari letusan Gunung Lewotobi Laki-laki dan respons parameter cuaca local termasuk temperatur permukaan ($^{\circ}\text{C}$), konsentrasi aerosol sulfat (kg/m^2), ketebalan optik awan (COT), dan curah hujan harian (mm/hari) di wilayah Kepulauan Nusa Tenggara?
2. Sejauh mana massa kolom SO_2 , yang diukur dalam Kiloton, berkorelasi dengan parameter atmosferik tersebut setelah erupsi, dan bagaimana pola korelasi silang (*cross-correlation*) mengungkap adanya jeda waktu (*lagged response*) dalam hubungan tersebut?
3. Bagaimana mekanisme mikrofisika awan, pembentukan aerosol sulfat, dan efek radiatif yang dipicu oleh emisi SO_2 dari erupsi Gunung Lewotobi Laki-laki berkontribusi pada perubahan parameter cuaca di wilayah sekitarnya?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan di atas, tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis interaksi emisi sulfur dioksida (SO_2) dari letusan Gunung Lewotobi Laki-laki serta mengkaji respons atmosferik lokal berupa perubahan suhu permukaan, konsentrasi aerosol sulfat, ketebalan optik awan (COT), dan curah hujan di wilayah Kepulauan Nusa Tenggara.
2. Mengevaluasi hubungan korelasional antara massa kolom SO_2 dengan parameter cuaca lokal tersebut melalui pendekatan korelasi silang (*cross-correlation*) guna mengidentifikasi adanya respons tertunda (*lagged response*) pasca erupsi.
3. Menginterpretasikan mekanisme fisik dan radiatif yang mendasari perubahan cuaca lokal, termasuk peran konversi SO_2 menjadi aerosol sulfat, efek radiatifnya, serta keterlibatan mikrofisika awan dalam memediasi perubahan parameter atmosferik yang diamati.

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan di atas, batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Wilayah penelitian dibatasi pada kawasan sekitar Gunung Lewotobi Laki-laki yang berada di Kepulauan Nusa Tenggara, mencakup wilayah daratan utama seperti Flores, Lembata, dan pulau-pulau kecil di sekitarnya.
2. Rentang waktu observasi mencakup periode sejak status erupsi berada pada Level IV (AWAS), yaitu tanggal 1 Oktober 2024, hingga 31 Desember 2024, yang merepresentasikan fase aktif erupsi vulkanik.
3. Jenis data emisi yang ditinjau terbatas pada konsentrasi sulfur dioksida (SO_2) hasil erupsi, yang dinyatakan sebagai jumlah kolom (column amount) dan diukur dalam satuan Kiloton.
4. Parameter cuaca yang dianalisis terdiri dari: Temperatur permukaan ($^{\circ}\text{C}$), Konsentrasi aerosol sulfat (kg/m^2), Ketebalan optik awan (Cloud Optical Thickness/COT), Curah hujan harian (mm/hari).

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut

1. Memberikan pemahaman ilmiah mengenai interaksi emisi sulfur dioksida (SO_2) dari letusan Gunung Lewotobi Laki-laki dengan parameter cuaca lokal, termasuk perubahan suhu, ketebalan optik awan, dan curah hujan melalui mekanisme konversi aerosol dan mikrofisika awan.
2. Mengembangkan pendekatan analisis korelasi silang (*cross-correlation*) untuk mengidentifikasi pola keterlambatan (*lagged response*) dalam hubungan antara aktivitas vulkanik dan parameter atmosferik, yang dapat digunakan dalam studi atmosfer tropis dan geofisika terapan.
3. Menyediakan dasar ilmiah bagi upaya mitigasi dampak cuaca ekstrem pasca-erupsi dan penguatan sistem peringatan dini di wilayah kepulauan vulkanik, khususnya di Nusa Tenggara Timur dan sekitarnya.