



PETIR VULKANIK: ANCAMAN TERSEMBUNYI DAN PEMANFAATANNYA DARI ERUPSI GUNUNG BERAPI DI INDONESIA

**Nur Safiqoh Arbaatin¹, Nur Faidatul Jannah¹, Muhammad Hafizh Abdullah¹,
Ahmad Fauzi Hendratmoko¹**

Program Studi Pendidikan Ilmu Pengetahuan Alam, Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

e-mail: nursafiqoh.22023@mhs.unesa.ac.id, nurfaidatul.22002@mhs.unesa.ac.id,
muhammadhafizh.22126@mhs.unesa.ac.id, ahmadhendratmoko@unesa.ac.id

Abstrak

Petir vulkanik merupakan fenomena alam yang sering terjadi pada saat aktivitas gunung berapi di Indonesia. Meski berpotensi memberikan manfaat sekaligus ancaman, penelitian mengenai fenomena ini masih sangat terbatas di dalam negeri. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi manfaat dan ancaman yang ditimbulkan oleh fenomena petir vulkanik serta pembahasan terkait hasil penelitian sebelumnya. 239 artikel awal ditemukan, yang disaring menjadi 6 penelitian terkini. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa petir vulkanik dapat dimanfaatkan untuk pemantauan jarak jauh letusan gunung berapi melalui deteksi awan debu dan parameter letusan. Pola spasial kemunculannya berguna untuk mempelajari dinamika material erupsi. Di sisi lain, fenomena ini berpotensi memicu kebakaran hutan dan menimbulkan risiko cedera. Petir vulkanik mempunyai potensi manfaat dan ancaman yang perlu dikaji lebih lanjut mengingat banyaknya gunung berapi aktif di Indonesia. Informasi ini berguna untuk lebih memahami fenomena alam ini dan memitigasi dampaknya di masa depan. Penelitian di masa depan harus melibatkan observasi lapangan langsung dan kolaborasi multidisiplin.

Kata kunci: Petir vulkanik; ancaman; manfaat.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak di Cincin Api Pasifik. Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar: Lempeng Indo-Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Cincin Api Pasifik mengikuti batas lempeng tektonik ini, membentuk jalur berbentuk tapal kuda di sekitar Samudera Pasifik. Lempeng tektonik di Cincin Api Pasifik selalu bergerak, bergesekan, bertabrakan, dan saling menjauh. Pergerakan ini mengakibatkan aktivitas geologi yang tinggi, seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, dan tsunami. Wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia (NKRI) secara geografis sebagian besar terletak pada pertemuan lempeng tektonik, sehingga wilayah tersebut rawan bencana alam dan banyak terdapat gunung berapi aktif, menurut data badan geologi kementerian. Energi dan sumber daya mineral, Indonesia memiliki lebih dari 140 gunung berapi aktif (Harrison, 2022).

Banyaknya gunung berapi di Indonesia yang masih aktif dan meletus seringkali menyebabkan terjadinya fenomena petir vulkanik. Sebuah penelitian yang dilakukan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa petir vulkanik di Indonesia paling sering terjadi di Pulau Jawa dan Sumatera. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa petir vulkanik lebih sering terjadi pada musim hujan. Seperti yang terjadi baru-baru ini, pada 17 April 2024, Indonesia kembali dihebohkan dengan fenomena petir vulkanik saat Gunung Ruang di Sulawesi Utara meletus. Berbeda dengan petir biasa yang berasal dari awan badai, tempat partikel es

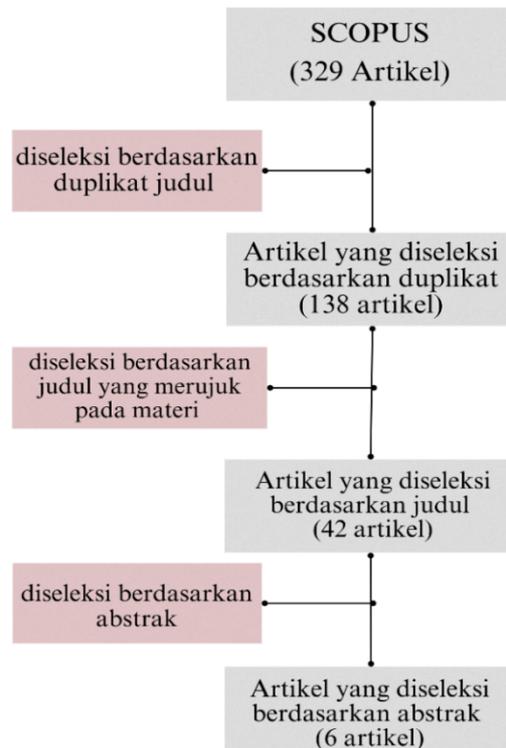


dan air bergesekan dan menghasilkan muatan listrik statis, petir vulkanik muncul dari interaksi kompleks antara material vulkanik dan atmosfer di sekitar kolom letusan. Petir vulkanik lebih sering terjadi pada letusan eksplosif, dimana kolom abu dan gas panas yang tinggi dapat menghasilkan muatan listrik yang signifikan. Letusan efusif yang lebih tenang umumnya tidak menghasilkan petir vulkanik (Cimarelli & Genareau, 2022). Misalnya pada 13 Februari 2014 saat Gunung Kelud meletus juga menimbulkan petir vulkanik yang hebat. Tiga sambaran petir terdeteksi oleh WWLLN pada pukul 15:48-15:56 UTC, terletak sekitar 4 km dari gunung berapi. Petir berkembang dalam arus kepadatan yang menyelimuti tanah dan awan tinggi, mirip dengan ledakan lateral dari Gunung St. Helens pada tanggal 18 Mei 1980. Meskipun jauh lebih kecil (meliputi 12 km² dibandingkan dengan 600 km²) (Hargie et al., 2019). Fenomena ini ditemukan hampir di seluruh wilayah Indonesia, namun tingkat penelitian yang dilakukan di Indonesia sendiri masih tergolong rendah. Sehingga diperlukan kajian mendalam mengenai ancaman yang ditimbulkan dan pemanfaatan petir vulkanik. Oleh karena itu, tujuan artikel ini adalah untuk mengidentifikasi ancaman dan pemanfaatan petir vulkanik akibat erupsi gunung berapi di Indonesia.

2. Metodologi

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah *literature review* yang dilanjutkan dengan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-analyses*) sebagai tinjauan sistematis. Pencarian database artikel *literature review* ini dilakukan pada tanggal 19 April 2024. Database yang digunakan untuk pencarian artikel adalah SCOPUS. Pemanfaatan database ini sangat mendukung karena bersifat open access dan mudah untuk mendownload artikel sehingga dapat memperoleh informasi yang lengkap mengenai petir vulkanik: ancaman tersembunyi dan pemanfaatannya dari letusan gunung berapi di Indonesia untuk meningkatkan kualitas pengetahuan, serta mendapatkan informasi lebih banyak dan lebih banyak lagi. informasi terpercaya.

Dalam metode prisma analitik, ada empat langkah. 1) Pencarian artikel di SCOPUS dengan kata kunci "*Volcanic Lightning*", 2) Pemilihan artikel berdasarkan judul rangkap, 3) Pemilihan artikel berdasarkan judul yang mengacu pada materi, 4) Pemilihan artikel berdasarkan abstrak. Flowchartnya dapat dilihat pada **Gambar 1**.

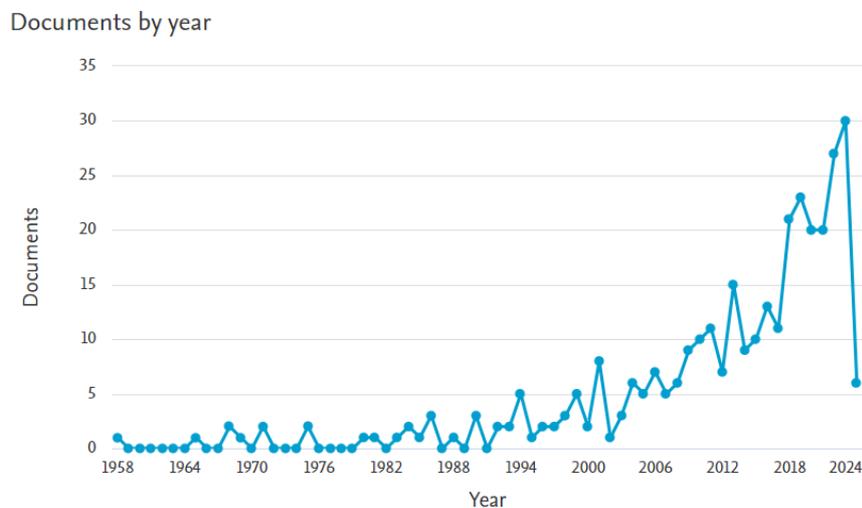


Gambar 1. Tahapan seleksi penyaringan artikel

4. Hasil dan Pembahasan

Petir vulkanik merupakan fenomena alam yang menarik dan kompleks, terjadi ketika letusan gunung berapi menimbulkan kondisi yang menghasilkan kilatan petir di sekitar area letusan. Fenomena ini tidak hanya menarik perhatian masyarakat, namun juga memikat para ilmuwan untuk mengkajinya lebih dalam (Smith, 2021). Semakin banyaknya penelitian dari tahun ke tahun menunjukkan bahwa petir vulkanik menjadi topik yang semakin relevan dan penting dalam kajian vulkanologi dan meteorologi. Grafik peningkatan penelitian di seluruh dunia berdasarkan SCOPUS dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Gambar 2. Bagan penelitian terkait petir vulkanik berdasarkan SCOPUS



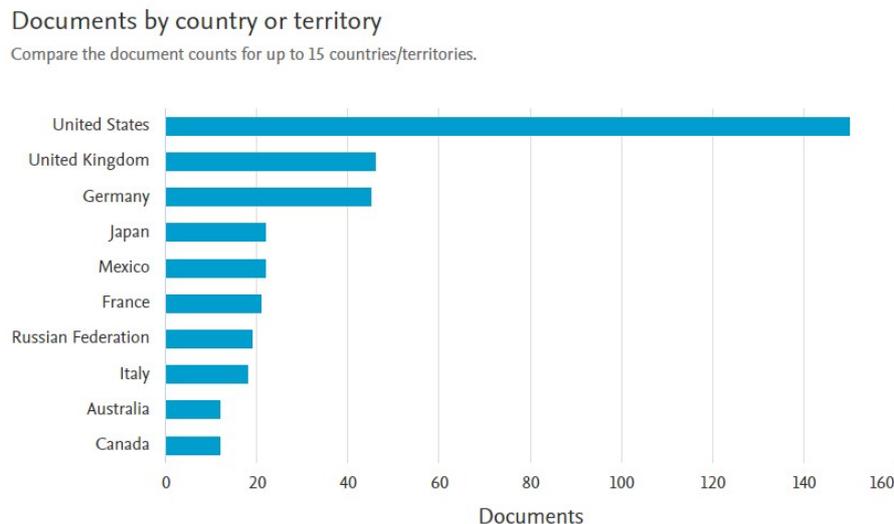


Berdasarkan Gambar 2, terdapat tren peningkatan yang konsisten terhadap penelitian petir vulkanik dari tahun ke tahun. Pada tahun 2021, terdapat 20 penelitian yang dilakukan terkait fenomena tersebut. Jumlah ini meningkat signifikan pada tahun 2022, dengan total 27 penelitian. Peningkatan ini berlanjut pada tahun 2023, dimana telah dilakukan 30 penelitian. Meski pada tahun 2024 hingga bulan Mei, jumlah penelitian yang tercatat hanya mencapai 6, namun tren secara keseluruhan menunjukkan minat yang kuat di kalangan ilmuwan dan peneliti untuk terus menyelidiki fenomena petir vulkanik di masa depan.

Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa petir vulkanik merupakan topik penelitian yang dinamis dan terus berkembang. Meningkatnya minat dari tahun ke tahun mencerminkan pentingnya fenomena ini dalam memahami proses alam yang kompleks dan berbahaya. Penelitian di masa depan mungkin akan lebih fokus pada pemanfaatan teknologi canggih untuk observasi dan analisis, serta kolaborasi internasional untuk memperluas pemahaman kita tentang petir vulkanik. Dengan demikian, penelitian mengenai petir vulkanik diharapkan dapat terus menarik perhatian banyak peneliti dan menghasilkan wawasan serta manfaat yang lebih mendalam bagi ilmu pengetahuan dan masyarakat.

Gambar 3. Jumlah penelitian terkait petir vulkanik menurut negara

Berdasarkan data pada Gambar 3 terlihat bahwa penelitian mengenai petir vulkanik lebih banyak dilakukan di negara tertentu dibandingkan negara lain.



Amerika Serikat menempati posisi pertama dengan jumlah penelitian yang sangat dominan yaitu sebanyak 150 penelitian. Hal ini menunjukkan betapa besarnya perhatian dan sumber daya yang dialokasikan Amerika Serikat untuk mempelajari fenomena petir vulkanik. Penelitian yang dilakukan di negara ini dapat mencakup berbagai aspek, mulai dari pemahaman dasar tentang mekanisme terbentuknya petir vulkanik, dampaknya terhadap lingkungan, hingga pengembangan teknologi untuk mendeteksi dan memprediksi kejadian tersebut. Di posisi kedua, Inggris telah melakukan 46 penelitian tentang petir vulkanik. Angka tersebut menunjukkan tingginya minat para ilmuwan di Inggris untuk memahami fenomena tersebut, meski wilayahnya tidak berada di zona vulkanik aktif seperti Amerika Serikat. Penelitian di Inggris kemungkinan besar akan fokus pada analisis data global dan pengembangan model teoretis yang dapat diterapkan secara universal. Jerman berada di urutan ketiga dengan 45 studi. Negara ini memiliki tradisi penelitian yang kuat di bidang geofisika



dan atmosfer, sehingga tidak mengherankan jika petir vulkanik juga menjadi salah satu fokus kajian. Penelitian di Jerman dapat mencakup pengembangan teknologi pemantauan dan prediksi, serta studi perbandingan dengan fenomena meteorologi lainnya. Selanjutnya Jepang dan Meksiko masing-masing melakukan 22 penelitian. Kedua negara tersebut terletak di zona Cincin Api Pasifik yang diketahui memiliki aktivitas vulkanik tinggi. Penelitian di Jepang dan Meksiko kemungkinan besar akan fokus pada aspek praktis, seperti mitigasi risiko bencana dan pengembangan sistem peringatan dini untuk melindungi masyarakat dari bahaya letusan gunung berapi dan petir gunung berapi. Perancis telah melakukan 21 penelitian, yang menunjukkan minat yang signifikan meskipun negara tersebut tidak memiliki banyak gunung berapi aktif. Penelitian di Perancis mungkin lebih fokus pada analisis teoritis dan kolaborasi internasional. Rusia dengan 19 penelitian, dan Italia dengan 18 penelitian, juga menunjukkan perhatian yang cukup besar terhadap fenomena ini, mungkin sebagian besar terkait dengan keberadaan gunung berapi aktif di wilayahnya sehingga memerlukan pemahaman mendalam tentang potensi ancaman petir vulkanik. Australia dan Kanada, yang masing-masing memiliki 12 penelitian, menunjukkan minat yang relatif lebih rendah. Kedua negara ini mungkin tidak memiliki aktivitas vulkanik setinggi negara-negara lain yang disebutkan, namun tetap menunjukkan bahwa mereka memiliki kontribusi dalam penelitian global mengenai petir vulkanik.

Dari data tersebut terlihat bahwa Indonesia belum termasuk negara yang aktif dalam penelitian petir vulkanik. Hal ini sangat disayangkan mengingat Indonesia merupakan salah satu negara dengan jumlah gunung berapi aktif terbanyak di dunia dan terletak di Cincin Api Pasifik sehingga rentan terhadap fenomena petir vulkanik saat terjadi letusan gunung berapi. Fenomena ini patut menjadi perhatian besar bagi Indonesia, karena dampaknya yang signifikan terhadap keselamatan masyarakat dan penerbangan. Minimnya penelitian mengenai petir vulkanik di Indonesia menunjukkan masih rendahnya minat dan kesadaran para ilmuwan dan lembaga penelitian lokal mengenai pentingnya memahami fenomena tersebut. Padahal, dengan banyaknya gunung berapi aktif di Indonesia, peluang untuk melakukan penelitian lapangan sangat besar. Penelitian mendalam tentang petir vulkanik tidak hanya akan membantu dalam mitigasi risiko bencana, namun juga dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengetahuan global tentang fenomena ini (Behnke, 2021).

Berdasarkan informasi diperoleh melalui metode analisis prisma yang telah dijelaskan sebelumnya. Proses ini memastikan bahwa penelitian yang dilakukan berfokus pada sumber yang paling berkualitas dan relevan, sehingga hasil yang dihasilkan beralasan dan valid. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran jelas mengenai ancaman atau manfaat petir vulkanik, namun juga didukung oleh bukti ilmiah yang dipilih secara ketat. Metode analisis prisma ini menunjukkan pentingnya proses seleksi literatur yang sistematis dalam menghasilkan penelitian yang berkualitas dan dapat diandalkan. Berikut hasil analisis dari 6 jurnal tersebut diantaranya terdapat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Data 6 Jurnal SCOPUS terkait Bahaya dan Pemanfaatan Petir Vulkanik

No	Pengarang	Tahun	Hasil
1	Mather & Harrison	2006	Petir vulkanik dapat digunakan sebagai salah satu teknik pemantauan aktivitas gunung berapi baik di Bumi maupun di planet lain dengan menggunakan penginderaan jauh. Aktivitas listrik vulkanik



			menyediakan metode penginderaan jauh terhadap aktivitas vulkanik. Bahaya langsung petir vulkanik terhadap manusia umumnya rendah dibandingkan dengan aspek aktivitas gunung berapi lainnya, seperti aliran piroklastik dan gas panas, namun risiko cedera akibat petir masih ada.
2	Jouhn et al.	2010	Petir vulkanik dapat digunakan untuk mendeteksi dan menemukan lokasi awan abu vulkanik, bahkan ketika kondisi meteorologi menghalangi pengamatan dari satelit dan radar darat. Hal ini berguna untuk memantau letusan gunung berapi. Pola spasial lokasi petir vulkanik dapat memberikan indikasi ukuran dan pergerakan awan abu sehingga berguna untuk mempelajari dinamika letusan. Petir vulkanik dapat memicu kebakaran hutan, terutama jika terjadi di dalam atau di dekat awan abu.
3	Hargie et al.	2019	Letusan Gunung Kelud di Indonesia yang terjadi pada tanggal 13 Februari 2014 menghasilkan penelitian Aktivitas awal letusan terdeteksi sebagai anomali termal pada pukul 15:46 UTC, bertepatan dengan arah ledakan awal letusan dan hanya sedikit petir vulkanik. pemogokan. Setelah jeda singkat, letusan tersebut menghasilkan kolom abu dan payung yang terus menerus mencapai stratosfer tropis.
4	Cimarelli & Genareau	2022	Petir vulkanik dapat digunakan sebagai alat untuk melacak perubahan kondisi letusan dan dampak bahaya yang terkait, sehingga membantu upaya pemantauan. Petir vulkanik meninggalkan bukti fisik berupa endapan abu. Tekstur yang disebabkan oleh petir telah didokumentasikan. Penelitian petir vulkanik ini memberikan informasi mengenai perubahan ukuran butir abu, sebaran ukuran, sifat kimia dan kemagnetan abu.
5	Yuen et al.	2022	Penelitian ini menunjukkan bahwa petir vulkanik pada letusan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai merupakan bagian dari fenomena yang sangat kompleks yang melibatkan interaksi antara aktivitas seismik, atmosfer, dan vulkanik. Deteksi dan analisis petir vulkanik dapat membantu pemahaman dan pemantauan letusan gunung berapi serupa di masa depan.
6	Fattaruso L.	2024	Petir vulkanik dianggap sebagai sumber nitrogen yang terikat secara abiotik dalam jumlah besar, yang merupakan bahan penyusun kehidupan awal di bumi. Sampai saat ini, nitrogen yang terfiksasi secara abiotik dalam jumlah besar belum ditemukan dalam catatan geologi atau dari letusan gunung berapi saat ini, mengingat peristiwa petir vulkanik dan kondisi kering yang diperlukan sangat jarang terjadi. Nitrat yang dihasilkan sangat larut sehingga sulit tertahan dalam



			endapan vulkanik kecuali dalam kondisi kering yang sangat jarang terjadi.
--	--	--	---

Petir vulkanik merupakan fenomena alam menarik yang terjadi saat terjadi letusan gunung berapi. Selain menambahkan elemen visual yang dramatis pada letusan, petir vulkanik menawarkan peluang penting untuk memantau aktivitas gunung berapi baik di Bumi maupun di planet lain melalui penginderaan jauh. Aktivitas listrik vulkanik menyediakan metode penginderaan jarak jauh terhadap aktivitas vulkanik, sehingga memungkinkan para ilmuwan mendeteksi dan memantau letusan dari jarak yang aman. Bahaya langsung dari petir vulkanik terhadap manusia biasanya lebih rendah dibandingkan ancaman lain dari aktivitas gunung berapi, seperti aliran piroklastik dan gas panas. Namun, risiko cedera akibat sambaran petir tetap ada. Selain itu, semburan listrik vulkanik tetap berbahaya meskipun tidak cukup untuk menghasilkan petir, karena memiliki elektrifikasi yang lebih tinggi dibandingkan lingkungan sekitarnya. Petir vulkanik dapat digunakan untuk mendeteksi dan menemukan lokasi awan abu vulkanik, bahkan ketika kondisi meteorologi menghalangi pengamatan dari satelit dan radar darat. Hal ini sangat berguna untuk memantau letusan gunung berapi. Pola spasial lokasi petir vulkanik dapat memberikan indikasi ukuran dan pergerakan awan abu, sehingga sangat berguna untuk mempelajari dinamika letusan. Namun petir vulkanik juga dapat memicu kebakaran hutan, terutama jika terjadi di dalam atau di dekat awan abu. Hal ini dapat merusak ekosistem dan lingkungan sekitar gunung. Selain itu, sistem pendeteksi petir mungkin tidak dapat mendeteksi semua petir vulkanik karena sinyal petir intra-awan biasanya lebih lemah dibandingkan petir dari awan ke tanah (John et al., 2010).

Menurut (Smith, 2021) petir vulkanik dapat terjadi melalui beberapa tahapan, yang pertama adalah terbentuknya ion atau atom bermuatan di dalam gunung berapi, yang disebabkan oleh suhu yang tinggi dan komposisi material di dalamnya yang beragam. Hal ini menciptakan partikel bermuatan positif dan negatif di awan vulkanik. Tahap kedua melibatkan pemisahan muatan positif dan negatif berdasarkan perbedaan massa dan kecepatan ion. Ion-ion yang lebih ringan bergerak lebih cepat dan menjauhi ion-ion yang lebih berat, sehingga menciptakan pemisahan muatan. Tahap terakhir adalah terjadinya petir ketika perbedaan tegangan antara muatan positif dan negatif di awan mencapai puncaknya sehingga menyebabkan pelepasan muatan besar antara awan dan bumi. Ion positif dan negatif muncul dari ionisasi partikel yang dilepaskan oleh gunung berapi, di mana suhu tinggi menyebabkan partikel kehilangan atau memperoleh elektron, sehingga menimbulkan muatan. Ketika potensial antara awan dan bumi mencapai ambang batas tertentu, hal ini memicu aliran elektron dari awan ke bumi atau sebaliknya sehingga menimbulkan kilatan petir vulkanik (Behnke, 2021).

Letusan gunung berapi Kelud di Indonesia pada 13 Februari 2014 memberikan contoh penting bagaimana petir vulkanik dapat dimanfaatkan untuk penelitian ilmiah. Aktivitas awal letusan terdeteksi anomali termal pada pukul 15.46 WIB, bertepatan dengan arah ledakan awal letusan dan hanya sedikit sambaran petir vulkanik. Setelah jeda singkat, letusan tersebut menghasilkan kolom abu dan payung yang terus menerus mencapai stratosfer tropis. Petir vulkanik dalam konteks ini memberikan data penting yang membantu para ilmuwan memahami proses letusan dan dampaknya. Petir vulkanik juga dapat digunakan sebagai alat untuk melacak perubahan kondisi letusan dan dampak bahaya yang terkait, sehingga membantu



upaya pemantauan. Petir vulkanik meninggalkan bukti fisik pada endapan abu, seperti tekstur akibat petir yang telah terdokumentasi. Penelitian tentang petir vulkanik ini memberikan informasi penting mengenai perubahan ukuran butir abu, distribusi ukuran, sifat kimia dan kemagnetan abu. Studi ini menunjukkan bahwa petir vulkanik pada letusan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai merupakan bagian dari fenomena yang sangat kompleks yang melibatkan interaksi antara aktivitas seismik, atmosfer, dan vulkanik. Petir vulkanik yang terjadi bersamaan dengan berbagai fenomena fisik lain yang ditimbulkan oleh letusan, memberikan wawasan penting mengenai dinamika letusan eksplosif dan interaksi antara berbagai komponen geofisika. Deteksi dan analisis petir vulkanik dapat membantu pemahaman dan pemantauan letusan gunung berapi serupa di masa depan (Hargie et al. 2019).

Petir vulkanik terjadi ketika ada penumpukan listrik statis di atmosfer saat terjadi letusan gunung berapi. Proses ini melibatkan tiga komponen utama: abu vulkanik, uap air, dan elektrifikasi atmosfer. Abu vulkanik membentuk awan bermuatan positif dan negatif. Bila beda potensial antara awan dan bumi mencapai ambang batas tertentu, maka dapat menyebabkan lepasnya muatan negatif dari awan ke bumi atau sebaliknya sehingga menimbulkan petir. Uap air yang dilepaskan juga membentuk awan bermuatan. Saat uap air mengembun dan bertabrakan, elektron dilepaskan dan terjadi polarisasi, menciptakan medan listrik hingga 100 juta volt. Proses elektrifikasi atmosfer terjadi ketika udara panas hasil letusan naik, membentuk awan vertikal dengan muatan terpolarisasi, sehingga menghasilkan medan listrik yang kuat. Prosesnya diawali dengan ionisasi partikel gunung berapi, yang memisahkan elektron dari partikel, sehingga memudahkan pemisahan muatan di awan, membuka jalur aliran listrik, dan akhirnya menghasilkan petir vulkanik. Faktor lain yang tampaknya mempengaruhi petir vulkanik adalah kandungan air letusan. Semakin tinggi kadar air maka semakin besar kemungkinan terjadinya petir (Yuen et al., 2022). Korelasi ini menurut Castro, JM telah dibuktikan pada tahun 2020 meskipun mekanisme pastinya belum sepenuhnya dipahami. Fakta bahwa petir vulkanik lebih sering terjadi di musim dingin mendukung hipotesis ini. Ketinggian bulu-bulu juga tampaknya mempunyai peranan penting. Pada gumpalan abu yang lebih tinggi (7-12 km), konsentrasi uap air yang tinggi merupakan faktor utama terjadinya aktivitas petir, sedangkan pada gumpalan abu yang lebih rendah (<4 km), emisi fraktal tampaknya menjadi faktor penentu. Selain menakjubkan, petir vulkanik juga dapat menghasilkan formasi batuan unik seperti fulgurit dan bola vulkanik. Bola vulkanik terbentuk ketika petir menyambar partikel abu, melelehkannya dan membentuk bola setelah pendinginan (Mather & Harrison, 2015).

Menurut (Fattaruso, 2024) selain sebagai alat pemantauan, petir vulkanik juga mempunyai implikasi penting bagi kehidupan di Bumi. Petir vulkanik diperkirakan menjadi sumber nitrogen yang terikat secara abiotik dalam jumlah besar, yang merupakan bahan penyusun kehidupan awal di Bumi. Namun, hingga saat ini, nitrogen yang terfiksasi secara abiotik dalam jumlah besar belum ditemukan dalam catatan geologi atau dari letusan gunung berapi saat ini. Sebab, kejadian petir vulkanik dan kondisi kering yang diperlukan sangat jarang terjadi. Nitrat yang dihasilkan sangat mudah larut sehingga sulit tertahan dalam endapan vulkanik kecuali dalam kondisi kering yang sangat jarang terjadi. Indonesia dengan aktivitas vulkaniknya yang tinggi menawarkan banyak peluang untuk memanfaatkan petir vulkanik dalam penelitian dan pemantauan. Penggunaan teknologi modern seperti sensor listrik dan penginderaan jauh dapat membantu meningkatkan efektivitas pemantauan petir vulkanik. Dengan menggunakan teknologi ini, para peneliti dapat mendeteksi dan melacak aktivitas listrik dalam gumpalan abu secara real-time, sehingga



memungkinkan respons yang cepat terhadap letusan dan mitigasi risiko yang lebih baik (Mather & Harrison, 2015). Selain itu, data yang dikumpulkan dari pemantauan petir vulkanik dapat digunakan untuk memodelkan dan memprediksi letusan di masa depan, sehingga memberikan informasi berharga untuk perencanaan mitigasi bencana dan perlindungan masyarakat.

Berdasarkan jurnal yang telah diteliti, terdapat beberapa ancaman dan kegunaan petir vulkanik. Umumnya sambaran petir dapat memicu kebakaran hutan di sekitar gunung berapi, terutama jika terdapat bahan yang mudah terbakar seperti kayu kering atau tumbuh-tumbuhan (Springsklee, 2022). Petir vulkanik berdampak serius pada sistem penerbangan dan komunikasi, terutama akibat asap, gas dan partikel padat yang terlepas saat terjadi letusan gunung berapi. Dampak tersebut antara lain terganggunya mesin pesawat akibat abu vulkanik yang masuk dan membentuk lapisan keras di dalam mesin, terganggunya sistem navigasi akibat terhalangnya sinyal radar oleh abu, rusaknya kaca depan pesawat akibat partikel padat. Gangguan komunikasi radio antara pesawat dan menara pengatur lalu lintas udara, dan dampak terhadap sinyal elektronik yang dapat mengganggu sistem telekomunikasi, navigasi satelit, dan jaringan komunikasi lainnya, namun petir vulkanik yang dihasilkan selama letusan gunung berapi diperkirakan memainkan peran penting dalam pengolahan atmosfer. Nitrogen mampu memutus ikatan molekul N_2 sehingga nitrogen tersedia untuk diserap organisme. Penemuan kandungan nitrat dalam jumlah tinggi pada endapan abu vulkanik menunjukkan bahwa proses pengambilan nitrogen terjadi akibat adanya petir pada letusan bersejarah. Temuan ini mendukung peran petir dalam memasok nitrogen yang diperlukan bagi kehidupan. Jumlah nitrogen yang disimpan oleh satu letusan besar sebanding dengan kapasitas produksi pupuk tahunan, sehingga memperkuat kontribusi petir vulkanik terhadap ketersediaan nitrogen pada awal kehidupan (Aroskay, 2024). Sifat mekanis dan dinamis dari letusan sering kali menghasilkan gumpalan aerosol debu vulkanik yang jelas, yang disuntikkan ke atmosfer bagian bawah atau stratosfer. Aktivitas listrik dari gumpalan debu vulkanik ini menyediakan metode penginderaan jauh aktivitas vulkanik (Cimarelli, 2022).

Dalam jangka panjang petir vulkanik juga mempunyai peranan dalam keseimbangan atmosfer, petir vulkanik dapat membantu membersihkan atmosfer dari polutan seperti abu dan gas yang dikeluarkan saat terjadi letusan gunung berapi (Springsklee, 2022). Mekanismenya, petir vulkanik menghasilkan energi listrik yang sangat besar sehingga mampu memecah molekul udara menjadi ion positif dan negatif. Ion-ion ini kemudian bereaksi dengan polutan seperti abu dan gas, mengubahnya menjadi partikel yang lebih besar dan lebih berat. Partikel-partikel yang lebih besar dan lebih berat ini kemudian menarik dan bergabung satu sama lain, membentuk agregat yang lebih besar. Agregat besar ini cukup berat untuk jatuh ke bumi melalui curah hujan, seperti hujan atau salju. Jadi, petir vulkanik secara tidak langsung membantu mengurangi polusi udara dengan menghilangkan polutan dari atmosfer. Hal ini dapat membantu meningkatkan kualitas udara dan mengurangi dampak negatif pencemaran terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Fattarusso, 2024).

Upaya pemantauan petir vulkanik di Indonesia dapat diperkuat melalui kerja sama antara lembaga penelitian, pemerintah, dan masyarakat. Edukasi dan sosialisasi mengenai risiko dan tanda-tanda petir gunung berapi dapat meningkatkan kesadaran dan kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi letusan gunung berapi. Selain itu, investasi dalam teknologi pemantauan dan penelitian akan membantu mengembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif. Dalam jangka panjang, penelitian



tentang petir vulkanik juga dapat memberikan kontribusi penting bagi ilmu dasar proses geofisika dan kimia di Bumi. Pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme terbentuknya petir vulkanik dan interaksinya dengan lingkungan sekitar dapat membantu dalam mengembangkan teori baru tentang dinamika letusan gunung berapi dan aktivitas seismik. Selain itu, penelitian ini juga dapat membuka peluang baru bagi inovasi teknologi di bidang pemantauan bencana dan mitigasi risiko.

5. Simpulan

Petir vulkanik merupakan fenomena alam yang sering terjadi pada saat terjadi letusan gunung berapi di Indonesia. Meski terlihat menarik, fenomena ini mempunyai berbagai implikasi positif dan negatif yang perlu dikaji lebih lanjut. Riset literatur yang dilakukan menunjukkan bahwa secara umum petir vulkanik dapat dimanfaatkan untuk pemantauan aktivitas gunung berapi dari jarak jauh. Pola kemunculannya dapat memberikan petunjuk mengenai karakteristik letusan dan pergerakan material yang dikeluarkan. Di sisi lain, petir vulkanik berpotensi menimbulkan ancaman seperti memicu kebakaran hutan dan menimbulkan risiko cedera akibat sambaran petir. Fenomena ini juga dapat mempengaruhi dinamika awan debu vulkanik dan transportasinya. Oleh karena itu, diperlukan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme terbentuknya dan karakteristik petir vulkanik pada berbagai kondisi letusan gunung berapi. Meski Indonesia memiliki potensi besar terhadap fenomena ini mengingat banyaknya gunung berapi aktif, namun kajian ilmiah terkait petir vulkanik masih sangat terbatas di Tanah Air.

Daftar Referensi

- Aroskay, A., Martin, E., Bekki, S., Le Pennec, JL, Savarino, J., Temel, A & Szopa, S. (2024). Bukti geologi fiksasi N yang ekstensif oleh petir vulkanik selama letusan eksplosif yang sangat besar. *Prosiding Akademi Ilmu Pengetahuan Nasional*, 121 (7), e2309131121.
- Behnke, SA, Edens, H., Senay, S., Iguchi, M., & Miki, D. (2021). Karakteristik frekuensi radio dari petir vulkanik dan pelepasan ventilasi. *Jurnal Penelitian Geofisika: Atmosfer*, 126 (18), e2020JD034495.
- Castro, JM, Keller, F., Feisel, Y., Lanari, P., Helo, C., Mueller, SP, & Thomas, C. (2020). Pelapukan puncak gunung berapi Cascadian yang disebabkan oleh petir. *Surat Ilmu Bumi dan Planet*, 552, 116595.
- Cimarelli, C. (2022). *Jurnal Penelitian Vulkanologi dan Panas Bumi Tinjauan tentang elektrifikasi vulkanik di atmosfer dan petir vulkanik*. 422.
- Cimarelli, C., & Genareau, K. (2022). A review of volcanic electrification of the atmosphere and volcanic lightning. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107449>
- Fattaruso, L. (2024). Geologic evidence that volcanic lightning promotes life on Earth. In *Physics Today* (Vol. 77, Issue 4, pp. 20–20). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/pt.uhqj.hcpn>
- Hargie, K. A., Eaton, A. R. Van, Mastin, L. G., Holzworth, R. H., Ewert, J. W., & Pavolonis, M. (2019). Globally detected volcanic lightning and umbrella dynamics during the 2014 eruption of Kelud , Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 382, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.10.016>



- Harrison P. (2022). Development And Evaluation Of The Webgis Application To Support Volcanic Hazard Mitigation In The Southern Flank Of Merapi Volcano, Sleman Regency, Yogyakarta Province, Indonesia. *Geography, Environment, Sustainability*, 57.
- John, F., Murray, T. L., Hoblitt, R. P., & Neal, C. A. (2010). *Lightning Associated with the August 18, 1992, Eruption*.
- Mather, T. A., & Harrison, R. G. (2015). Electrification of volcanic plumes. In *Surveys in Geophysics* (Vol. 27, Issue 4). <https://doi.org/10.1007/s10712-006-9007-2>
- Smith, CM, Gaudin, D., Van Eaton, AR, Behnke, SA, Pembaca, S., Thomas, RJ, & Cimorelli, C. (2021). Gumpalan vulkanik impulsif menghasilkan petir vulkanik dan pelepasan ventilasi: Analisis statistik gunung berapi Sakurajima pada tahun 2015. *Geophysical Research Letters*, 48 (11), e2020GL092323.
- Springsklee, C., Scheu, B., Manga, M., Cigala, V., Cimorelli, C., & Dingwell, DB (2022). Pengaruh distribusi ukuran butir terhadap petir vulkanik yang dihasilkan laboratorium. *Jurnal Penelitian Geofisika: Bumi Padat*, 127 (10), e2022JB024390.
- Watson, L. M., Iezzi, A. M., Toney, L., Maher, S. P., Fee, D., McKee, K., Ortiz, H. D., Matoza, R. S., Gestrach, J. E., Bishop, J. W., Witsil, A. J. C., Anderson, J. F., & Johnson, J. B. (2022). Volcano infrasound: progress and future directions. *Bulletin of Volcanology*, 84(5). <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01544-w>
- Yuen, DA, Scruggs, MA, Spera, FJ, Zheng, Y., Hu, H., McNutt, SR, & Tanioka, Y. (2022). Di bawah permukaan: Gelombang skala planet yang disebabkan oleh tekanan, petir vulkanik, dan awan gas yang disebabkan oleh letusan bawah laut gunung berapi Hunga Tonga-Hunga Ha'apai. *Kemajuan Penelitian Gempa Bumi*, 2 (3), 100134.