

ANATOMI KLINIS ANCAMAN FISIK DAN KIMIAWI ABU VULKANIK TERHADAP TUBUH MANUSIA

Lavitz Leonhart Winardi
Universitas Kristen Krida Wacana
leonhartlavitz5@gmail.com

Abstract

Volcanic ash constitutes a distinct medical and geological hazard, structurally divergent from combustion residues such as household or organic dust. Composed of fragmented magmatic glass, crystalline silica, and mineral particulates generated through high-pressure fragmentation, volcanic ash exhibits jagged, abrasive, and chemically acidic surface properties capable of inducing multi-system tissue injury. This review synthesizes clinical, toxicological, and epidemiological literature addressing the pathophysiological consequences of ash exposure across the respiratory, ocular, dermatological, and gastrointestinal systems, with additional attention to fluoride-associated systemic toxicity. Acute mucosal abrasion, inflammatory bronchospasm, corneal epithelial injury, irritant contact dermatitis, and chronic silicotic fibrosis are examined as principal clinical manifestations, alongside the sociological dimensions of community risk perception and disaster preparedness in volcanically active regions such as Indonesia. Protective protocols, including fit-tested N95 and FFP2 respiratory devices, goggle-based ocular shielding, and friction-free irrigation techniques, are evaluated against empirical filtration-efficiency evidence. The discussion situates medical response within a broader geological and public-health domain, emphasizing that effective volcanic-ash mitigation requires interdisciplinary coordination between clinicians, geologists, and community-health institutions. Findings indicate that ash toxicity is governed by particle size, crystalline silica content, and surface acidity, variables that differ substantially between eruptions. The review concludes that preventive medical protocols, culturally sensitive risk communication, and continued toxicological research remain essential for reducing morbidity among populations residing near active volcanoes.

Keywords: volcanic ash; respiratory pathophysiology; silicosis; ocular trauma; fluorosis; disaster sociology

Abstrak

Abu vulkanik merupakan ancaman medis dan geologis yang berbeda secara struktural dari residu pembakaran seperti debu rumah tangga atau sisa organik. Tersusun atas fragmen kaca magmatik, silika kristalin, dan partikel mineral hasil fragmentasi bertekanan tinggi, abu vulkanik memiliki permukaan bergerigi, abrasif, dan bersifat asam yang mampu menimbulkan cedera jaringan pada berbagai sistem tubuh. Kajian ini merangkum literatur klinis, toksikologis, dan epidemiologis mengenai konsekuensi patofisiologis paparan abu vulkanik terhadap sistem respiratori, okular, dermatologis, dan gastrointestinal, disertai perhatian pada toksisitas sistemik akibat fluorida. Abrasi mukosa akut, bronkospasme inflamatorik, cedera epitel kornea, dermatitis kontak iritan, dan fibrosis silikotik kronis dibahas sebagai manifestasi klinis utama, bersama dimensi sosiologi persepsi risiko masyarakat dan kesiapsiagaan bencana di wilayah vulkanik aktif seperti Indonesia. Protokol proteksi, termasuk respirator N95 dan FFP2 yang diuji kerapatannya, pelindung mata bergaya goggle, dan teknik irigasi tanpa friksi, dievaluasi berdasarkan bukti empiris efisiensi filtrasi. Pembahasan menempatkan respons medis pada ranah geologis dan kesehatan masyarakat yang lebih luas, menegaskan bahwa mitigasi abu vulkanik yang efektif membutuhkan koordinasi interdisipliner antara klinisi, ahli geologi, dan lembaga kesehatan masyarakat. Temuan menunjukkan bahwa toksisitas abu ditentukan oleh ukuran partikel, kandungan silika kristalin, dan tingkat keasaman permukaan, variabel yang berbeda-beda antarletusan. Kajian ini menyimpulkan bahwa protokol medis preventif, komunikasi risiko yang peka budaya, dan penelitian toksikologi berkelanjutan tetap esensial untuk menurunkan morbiditas populasi yang bermukim di sekitar gunung berapi aktif.

Kata kunci: abu vulkanik; patofisiologi respiratori; silikosis; trauma okular; fluorosis; sosiologi bencana

A. Pendahuluan

1. Latar Belakang

Abu vulkanik kerap dipahami secara awam sebagai debu abu-abu yang menyelimuti atap rumah, kendaraan, dan permukaan jalan setelah sebuah gunung berapi meletus, sebuah persepsi yang secara medis dan geologis jauh dari memadai untuk menggambarkan bahaya sesungguhnya. Material ini terbentuk melalui fragmentasi magma bertekanan tinggi di dalam pipa kawah, menghasilkan pecahan batuan, mineral, dan kaca silikat yang terlontar ke atmosfer dalam ukuran mikroskopis hingga makroskopis. Abu pembakaran organik, seperti sisa kayu bakar atau debu rumah tangga, bersifat lunak, amorf, dan mudah terurai pada kontak dengan jaringan tubuh. Abu vulkanik justru mempertahankan struktur kristalin dan tepi setajam silet, hasil pendinginan cepat lelehan magma pada saat kontak dengan udara terbuka. Horwell dan Baxter menegaskan bahwa profil bahaya abu vulkanik bergantung pada ukuran partikel, kandungan silika kristalin, dan sifat fisikokimia permukaan partikel, tiga variabel yang berbeda antarletusan bahkan pada gunung berapi yang sama ¹. Karakteristik fisik inilah yang menempatkan abu vulkanik sebagai agen patogenik dan toksik terhadap saluran pernapasan, permukaan mata, kulit, dan sistem pencernaan manusia. Adagium kedokteran klasik *primum non nocere*, yang pertama, jangan mencederai, menuntut tenaga kesehatan dan masyarakat awam memahami secara akurat sifat fisikokimia abu vulkanik sebelum menyusun tindakan darurat. Pemahaman keliru mengenai abu vulkanik sebagai kotoran biasa dapat mendorong perilaku berisiko, seperti membersihkan atap tanpa pelindung pernapasan atau mengucek mata ketika terasa kelilipan, tindakan yang justru memperparah cedera jaringan. Kajian ini disusun untuk membedah anatomi abu vulkanik secara mikroskopis, menelusuri patofisiologinya terhadap empat sistem organ utama, serta menempatkan temuan klinis tersebut pada ranah geologis dan sosiologis kebencanaan di wilayah vulkanik aktif seperti Indonesia.

Indonesia berdiri pada jalur pertemuan tiga lempeng tektonik utama dan menaungi lebih dari seratus gunung berapi aktif, kondisi geologis yang menempatkan jutaan penduduk pada risiko paparan abu vulkanik berulang sepanjang hidup mereka. Letusan Gunung Merapi pada tahun 2010 mengakibatkan 386 korban jiwa dan kerugian ekonomi mencapai sekitar 403 juta

¹Claire J. Horwell and Peter J. Baxter, "The Respiratory Health Hazards of Volcanic Ash: A Review for Volcanic Risk Mitigation," *Bulletin of Volcanology* 69, no. 1 (2006): 3, <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>.

dolar Amerika Serikat, angka yang menggambarkan skala dampak kesehatan dan sosial dari aktivitas vulkanik eksplosif ². Sebagian besar korban jiwa pada peristiwa semacam ini berkaitan dengan aliran piroklastik dan lahar. Populasi yang selamat dari fase akut letusan tetap menghadapi paparan abu vulkanik berkepanjangan selama fase pembersihan dan pemulihan pascabencana. Ketahanan sebuah komunitas terhadap ancaman ini terbentuk dari interaksi antara literasi kesehatan bencana, persepsi risiko warga, dan tingkat kesiapsiagaan yang telah dilatih sebelumnya, tiga variabel yang terbukti menjadi prediktor signifikan bagi resiliensi komunitas rawan gunung berapi di Yogyakarta ³. Kondisi ini menegaskan urgensi integrasi pengetahuan medis klinis dengan strategi mitigasi berbasis komunitas, sebuah upaya yang membutuhkan kolaborasi antara vulkanolog, tenaga kesehatan, dan otoritas penanggulangan bencana. Lembaga penanggulangan bencana nasional dan daerah telah mengembangkan program komunikasi risiko dan pelatihan evakuasi mandiri pada sejumlah wilayah rawan letusan, inisiatif yang berkontribusi pada kecepatan respons warga ketika fase kritis erupsi berlangsung ⁴. Keberhasilan program tersebut tetap bergantung pada pemahaman akurat mengenai bahaya fisiologis abu vulkanik, pengetahuan yang menjadi fokus utama pembahasan pada bagian-bagian berikutnya kajian ini. Aspek geologis, klinis, dan sosiologis akan diuraikan secara berurutan untuk membangun gambaran menyeluruh mengenai ancaman kesehatan abu vulkanik beserta strategi mitigasinya bagi tenaga kesehatan dan masyarakat umum.

2. Rumusan Masalah dan Tujuan Kajian

Bertolak dari uraian tersebut, naskah ini merumuskan beberapa pertanyaan pokok yang hendak dijawab secara sistematis dan runtut. Pertanyaan pertama berkaitan dengan struktur mikroskopis dan komposisi kimiawi abu vulkanik yang membedakannya secara fundamental dari abu hasil pembakaran organik pada umumnya. Pertanyaan kedua menyangkut mekanisme patofisiologis yang bekerja ketika partikel abu bersentuhan dengan mukosa saluran napas, permukaan okular, epidermis kulit, dan saluran cerna manusia. Pertanyaan ketiga menelaah sejauh mana faktor sosiologis, termasuk persepsi risiko, pengalaman kebencanaan, dan jejaring

²I Made Moh. Yanuar Saifudin, "Disaster Health Literacy, Risk Perception, and Preparedness towards Resilience in a Volcano-Prone Community: A Cross-Sectional Study in Yogyakarta, Indonesia," *Journal of Community Empowerment for Health* 6, no. 3 (2023), <https://doi.org/10.22146/jcoemph.86343>.

³Saifudin, "Disaster Health Literacy."

⁴Supriyati D. Andreastuti et al., "Volcano Disaster Risk Management during Crisis: Implementation of Risk Communication in Indonesia," *Journal of Applied Volcanology* 12, no. 1 (2023): 8, <https://doi.org/10.1186/s13617-023-00129-2>.

komunikasi warga, memengaruhi keberhasilan penerapan protokol proteksi medis pada masyarakat yang bermukim di kawasan rawan letusan. Pertanyaan keempat mempertanyakan protokol proteksi klinis yang paling sesuai dengan bukti ilmiah terkini untuk meminimalkan morbiditas akibat paparan abu vulkanik pada populasi berisiko tinggi. Tujuan kajian ini adalah menyusun sintesis interdisipliner yang memadukan kedokteran klinis, geologi vulkanik, dan sosiologi bencana menjadi satu pemahaman yang koheren dan aplikatif bagi tenaga kesehatan, pengelola kebencanaan, serta masyarakat umum. Sintesis tersebut diharapkan melahirkan rekomendasi operasional yang dapat diadopsi oleh otoritas kesehatan masyarakat, khususnya pada wilayah gunung berapi tropis seperti Indonesia. Adagium hukum Latin *salus populi suprema lex esto*, kesehatan rakyat hendaknya menjadi hukum tertinggi, menjadi semangat yang melandasi keseluruhan penulisan naskah ini.

3. Metode Kajian

Kajian ini disusun melalui metode tinjauan pustaka naratif atas literatur toksikologi, kedokteran klinis, vulkanologi, dan sosiologi bencana yang telah ditelaah sejawat dan diterbitkan pada jurnal bereputasi maupun buku rujukan medis-geologi. Penelusuran pustaka dilakukan atas dasar tema yang relevan, mencakup patologi respiratori akibat silika kristalin, cedera okular akibat partikel abrasif, dermatitis kontak iritan berbasis asam, fluorosis sistemik, efektivitas alat pelindung pernapasan, serta persepsi risiko masyarakat lereng gunung berapi. Sumber primer yang digunakan mencakup studi eksperimental *in vitro* dan *in vivo*, penelitian epidemiologis, tinjauan klinis sistematis, serta studi lapangan pada komunitas terdampak letusan. Setiap temuan pustaka disintesis secara kritis untuk menghindari generalisasi berlebihan, mengingat karakteristik abu vulkanik amat bervariasi antarletusan sebagaimana ditegaskan pada bagian latar belakang. Analisis disusun secara tematik, dimulai dari uraian geologis komposisi abu, dilanjutkan patofisiologi tiap sistem organ, kemudian ditutup tinjauan sosiologis dan rekomendasi protokol proteksi klinis. Pendekatan naratif dipilih karena sifat data lintas disiplin yang heterogen serta tujuan kajian yang berorientasi pada sintesis konseptual, bukan estimasi efek statistik tunggal dari satu populasi spesifik. Keterbatasan metode ini diakui secara terbuka pada bagian diskusi, mengingat tinjauan naratif berpotensi memuat bias seleksi penulis meskipun setiap klaim yang disampaikan senantiasa dirujuk pada sumber yang dapat ditelusuri melalui pengenal digital objek atau DOI.

B. Komposisi Mikroskopis dan Karakteristik Geologis Abu Vulkanik

1. Struktur Morfologi dan Mekanisme Fragmentasi Magma

Abu vulkanik terbentuk melalui proses fragmentasi magma yang berlangsung dalam hitungan milidetik, ketika tekanan gas terlarut dalam lelehan silikat melampaui kekuatan tarik batuan di sekitar pipa kawah. Proses ini menghasilkan pecahan material dengan rentang ukuran mulai dari beberapa milimeter hingga kurang dari satu mikron, sebuah spektrum ukuran yang jauh lebih heterogen dibandingkan debu hasil pembakaran organik biasa. Ledakan bertekanan tinggi mendinginkan lelehan magma secara mendadak sebelum sempat membentuk kristal sempurna, sehingga sebagian besar partikel mengeras sebagai kaca vulkanik amorf dengan tepi bergerigi dan bersudut tajam. Damby dan kawan-kawan menjelaskan bahwa abu vulkanik merupakan campuran heterogen antara fragmen kaca amorf dan mineral kristalin, dengan kandungan silika kristalin berupa polimorf kristobalit yang kerap ditemukan pada abu hasil letusan bertipe kubah lava⁵. Struktur bergerigi dan asimetris inilah yang menjadikan partikel abu vulkanik berperilaku menyerupai ampelas mikroskopis ketika bersentuhan dengan permukaan jaringan lunak tubuh manusia. Perbandingan struktural antara abu vulkanik dan debu domestik menegaskan perbedaan fundamental pada tingkat kekerasan mineral, ketajaman tepi partikel, dan resistensi terhadap penguraian biologis maupun mekanis. Kandungan mineral pada setiap letusan sangat bergantung pada komposisi magma sumber, sehingga letusan bertipe riolitik cenderung menghasilkan proporsi silika kristalin lebih tinggi dibandingkan letusan bertipe basaltik. Perbedaan komposisi antarletusan inilah yang menjelaskan mengapa bahaya kesehatan abu vulkanik tidak dapat digeneralisasi secara seragam pada setiap peristiwa erupsi di berbagai belahan dunia.

2. Karakteristik Abrasif dan Sifat Mekanis Partikel

Karakteristik abrasif abu vulkanik berakar langsung dari komposisi kaca silikat dan kristal batuan yang menyusunnya, dua material yang secara alami memiliki kekerasan jauh melampaui jaringan epitel dan mukosa manusia. Ketika partikel bertepi tajam ini bergesekan dengan permukaan lembap seperti selaput lendir hidung, konjungtiva mata, atau lapisan kulit yang berkeringat, terjadi mikrolesi berulang yang secara kumulatif merusak integritas jaringan

⁵David E. Damby et al., "Volcanic Ash Activates the NLRP3 Inflammasome in Murine and Human Macrophages," *Frontiers in Immunology* 8 (2018), <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.02000>.

penghalang alami. Sifat abrasif ini berbeda secara kualitatif dari efek debu organik, yang cenderung larut atau terurai pada kontak dengan cairan tubuh alih-alih menggores permukaan jaringan. Horwell dan Baxter mencatat bahwa sifat fisikokimia permukaan partikel abu, termasuk luas permukaan spesifik dan reaktivitas kimiawinya, turut menentukan derajat iritasi yang timbul pada jaringan yang terpapar, di luar faktor ukuran partikel itu sendiri ⁶. Partikel berukuran lebih besar, meski secara teoretis kurang mampu mencapai saluran napas bagian bawah, tetap menimbulkan iritasi signifikan pada mukosa saluran napas atas dan permukaan mata akibat massa dan ketajaman tepinya. Partikel berukuran submikron, sebaliknya, mampu menembus hingga alveolus terdalam paru-paru, membawa potensi bahaya jangka panjang berupa akumulasi partikel yang sukar dibersihkan oleh mekanisme mukosiliar tubuh. Kombinasi antara ketajaman tepi, kekerasan mineral, dan variasi ukuran inilah yang menjadikan abu vulkanik sebagai ancaman mekanis multisistem, sebuah karakter jauh melampaui iritan permukaan yang bersifat sementara.

3. Toksisitas Kimiawi dan Aktivitas Permukaan Partikel

Abu pembakaran organik pada umumnya memiliki pH mendekati netral, sehingga interaksinya dengan jaringan tubuh manusia jarang menimbulkan reaksi kimiawi bermakna di luar iritasi mekanis ringan. Abu vulkanik justru berfungsi sebagai agen pembawa aerosol asam, sebab permukaan partikelnya kerap terlapisi residu gas vulkanik terkondensasi berupa sulfur dioksida, hidrogen klorida, dan hidrogen fluorida yang menempel selama proses pelontaran melalui kolom erupsi. Lapisan kimiawi ini tetap bersifat laten pada kondisi kering. Kondisi tersebut berubah drastis begitu partikel bersentuhan dengan cairan tubuh seperti keringat, air mata, atau lapisan mukus saluran napas, sebab kelembapan memicu aktivasi lapisan asam korosif pada permukaan partikel. Damby dan kawan-kawan menunjukkan bahwa permukaan kristobalit pada abu vulkanik mampu memicu aktivasi inflammasom NLRP3 pada makrofag manusia, memicu pelepasan sitokin interleukin-1 beta yang menjadi penanda respons peradangan akut ⁷. Mekanisme molekuler ini menjelaskan mengapa paparan abu vulkanik dapat memicu peradangan jaringan meski secara kasat mata partikel tersebut tampak sebagai debu yang relatif inert. Reaktivitas kimiawi permukaan partikel juga menjelaskan mengapa abu dari letusan freatik yang melibatkan interaksi magma dengan air tanah asam cenderung

⁶Horwell and Baxter, "The Respiratory Health Hazards of Volcanic Ash," 6.

⁷Damby et al., "Volcanic Ash Activates the NLRP3 Inflammasome."

membawa muatan unsur toksik dalam konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan abu dari letusan magmatik murni. Kombinasi antara trauma mekanis akibat ketajaman partikel dan aktivasi kimiawi akibat lapisan asam pada permukaannya menjadikan abu vulkanik sebagai ancaman ganda yang bekerja pada dua jalur patofisiologis sekaligus, mekanis dan kimiawi, terhadap jaringan tubuh manusia. Prinsip toksikologi klasik yang dirumuskan Paracelsus, *sola dosis facit venenum*, dosis yang menentukan racun, tetap relevan bagi uraian ini, mengingat derajat bahaya abu vulkanik meningkat secara proporsional terhadap durasi dan intensitas paparan kumulatif seseorang.

C. Patofisiologi Sistem Respiratori

1. Trauma Akut pada Mukosa Saluran Napas

Ancaman terbesar dari paparan abu vulkanik terhadap sistem respiratori terletak pada partikel berukuran di bawah sepuluh mikron, yang secara medis dikenal sebagai PM₁₀, dan partikel di bawah dua koma lima mikron yang dikenal sebagai PM_{2,5}. Ukuran submikron ini memungkinkan partikel melewati mekanisme penyaringan alami rongga hidung dan mencapai bronkiolus serta alveolus, tempat terjadinya pertukaran gas oksigen dan karbon dioksida pada paru-paru manusia. Gudmundsson menjelaskan bahwa gejala respiratori akut pascapaparan abu vulkanik, termasuk gejala menyerupai asma dan bronkitis, telah terdokumentasi secara konsisten pada berbagai peristiwa letusan di berbagai belahan dunia⁸. Partikel kaca mikroskopis yang terhirup menggores dinding mukosa saluran pernapasan, memicu respons inflamasi masif yang melibatkan pelepasan mediator kimiawi peradangan seperti histamin dan prostaglandin. Respons inflamasi ini bermanifestasi klinis sebagai hipersekresi mukus, yakni produksi dahak berlebih sebagai mekanisme pertahanan tubuh untuk membersihkan partikel asing dari saluran napas. Bronkospasme, yaitu penyempitan mendadak saluran napas akibat kontraksi otot polos bronkus, turut muncul sebagai respons refleks terhadap iritasi partikel abrasif dan senyawa asam yang terbawa pada permukaannya. Kombinasi hipersekresi mukus dan bronkospasme inilah yang menimbulkan gejala klinis berupa sesak napas, batuk produktif, dan mengi pada pasien yang terpapar abu vulkanik dalam konsentrasi tinggi.

Populasi dengan riwayat penyakit paru kronis menghadapi risiko eksaserbasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan populasi umum ketika terpapar abu vulkanik dalam durasi maupun

⁸Gunnar Gudmundsson, "Respiratory Health Effects of Volcanic Ash with Special Reference to Iceland: A Review," *Clinical Respiratory Journal* 5, no. 1 (2011): 3, <https://doi.org/10.1111/j.1752-699X.2010.00231.x>.

konsentrasi yang sama. Pasien asma, misalnya, memiliki saluran napas dengan hiperresponsivitas bronkus yang telah ada sebelumnya, sehingga paparan partikel abrasif dan iritan kimiawi abu vulkanik dapat memicu serangan asma akut yang lebih berat dibandingkan pemicu lingkungan biasa. Gudmundsson menegaskan bahwa eksaserbasi penyakit paru dan jantung yang sudah ada sebelumnya merupakan temuan yang berulang kali dilaporkan pada studi klinis pascaletusan, termasuk pada peristiwa erupsi Eyjafjallajökull di Islandia⁹. Pasien penyakit paru obstruktif kronik menghadapi risiko serupa, sebab saluran napas mereka telah mengalami kerusakan struktural kronis yang membuatnya lebih rentan terhadap iritan tambahan berupa partikel abrasif bersudut tajam. Pasien bronkitis kronis turut berisiko tinggi, mengingat produksi mukus yang sudah berlebih pada kondisi dasar mereka dapat diperparah oleh respons hipersekresi tambahan akibat paparan abu. Kelompok rentan lain yang perlu mendapat perhatian klinis khusus mencakup lansia dengan penurunan fungsi paru fisiologis, anak-anak dengan diameter saluran napas yang secara anatomis lebih sempit, serta ibu hamil yang mengalami perubahan fisiologis pada kapasitas respirasi. Triase klinis pascaletusan idealnya memprioritaskan kelompok-kelompok rentan tersebut untuk evakuasi dini dan pemberian alat pelindung pernapasan, mengingat keterlambatan penanganan pada populasi ini berpotensi berkembang menjadi gagal napas akut yang mengancam nyawa.

2. Ancaman Kronis: Silikosis dan Pneumokoniosis

Ancaman kronis yang paling dikhawatirkan dari paparan abu vulkanik berulang adalah silikosis, penyakit paru akibat inhalasi partikel silika kristalin bebas dalam jangka waktu lama, umumnya bertahun-tahun hingga puluhan tahun. Pollard menjelaskan bahwa mekanisme patologis silikosis dimulai dari deposisi partikel silika pada alveolus paru, diikuti fagositosis partikel tersebut oleh makrofag alveolar sebagai respons imun bawaan tubuh¹⁰. Makrofag yang menelan partikel silika kristalin mengalami kerusakan membran lisosom akibat sifat abrasif dan sitotoksik partikel tersebut, memicu pelepasan enzim litik ke sitoplasma sel dan menyebabkan kematian makrofag itu sendiri. Yang dan kawan-kawan menambahkan bahwa proses kematian makrofag ini merangsang proliferasi fibroblas dan produksi kolagen berlebih, sebuah siklus peradangan kronis yang berujung pada pembentukan nodul fibrotik ireversibel

⁹Gudmundsson, "Respiratory Health Effects of Volcanic Ash," 5.

¹⁰Kenneth Michael Pollard, "Silica, Silicosis, and Autoimmunity," *Frontiers in Immunology* 7 (2016), <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00097>.

pada jaringan paru¹¹. Nodul fibrotik tersebut bersifat progresif, bahkan dapat terus berkembang meski paparan silika telah dihentikan sepenuhnya, karakteristik yang membedakan silikosis dari banyak penyakit paru akibat kerja lainnya yang bersifat reversibel pada tahap dini. Fibrosis paru yang progresif ini secara bertahap merusak arsitektur alveolus, mengurangi luas permukaan efektif untuk pertukaran gas, dan menurunkan kapasitas difusi oksigen secara permanen. Populasi pekerja luar ruang, termasuk petani, penambang pasir vulkanik, dan pekerja yang secara rutin membersihkan endapan abu, menghadapi risiko kumulatif tertinggi mengingat durasi dan intensitas paparan harian yang jauh melampaui masyarakat umum yang hanya terpapar secara insidental.

Kajian epidemiologis dan toksikologis mengenai risiko silikosis akibat abu vulkanik secara khusus baru berkembang signifikan sejak letusan Gunung St. Helens pada tahun 1980, mengingat kebutuhan data paparan dan karakterisasi mineralogi yang sangat rinci untuk penilaian risiko yang akurat¹². Letusan Soufrière Hills di Montserrat yang berlangsung sejak pertengahan dekade 1990-an menjadi rujukan penting berikutnya, mengingat durasi erupsi yang panjang memungkinkan pengamatan efek kesehatan jangka menengah pada populasi yang bermukim di sekitar kawasan letusan. Studi terbaru mengenai patogenesis silikosis menegaskan bahwa proses inflamasi dan fibrosis pada penyakit ini melibatkan jalur molekuler yang kompleks, termasuk keterlibatan protein struktural fibroblas yang teraktivasi oleh sinyal mekanis dari lingkungan ekstraselular yang kaku¹³. Pemahaman jalur molekuler ini membuka peluang pengembangan terapi target di masa depan, meski pada saat ini penatalaksanaan silikosis tetap berfokus pada pencegahan paparan lanjutan dan tata laksana suportif terhadap gejala. Adagium kedokteran preventif, *praestat cautela quam medela*, pencegahan lebih baik daripada pengobatan, menemukan relevansi klinis yang sangat kuat pada konteks silikosis, mengingat sifat kerusakan paru yang ireversibel begitu fibrosis telah terbentuk. Edukasi mengenai bahaya paparan abu vulkanik kronis idealnya disampaikan secara proaktif kepada populasi pekerja berisiko tinggi, bukan menunggu munculnya gejala klinis yang pada tahap tersebut sudah menandakan kerusakan struktural paru yang bersifat permanen. Kolaborasi antara dokter spesialis paru, ahli kesehatan kerja, dan otoritas kesehatan masyarakat setempat

¹¹Bijun Yang et al., "Silicosis: From Pathogenesis to Therapeutics," *Frontiers in Pharmacology* 16 (2025), <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1516200>.

¹²Horwell and Baxter, "The Respiratory Health Hazards of Volcanic Ash," 14.

¹³Yang et al., "Silicosis: From Pathogenesis to Therapeutics."

menjadi kunci keberhasilan program pencegahan silikosis pada populasi yang bermukim permanen di lereng gunung berapi aktif.

D. Patofisiologi Sistem Okular

1. Anatomi Kornea dan Kerentanan terhadap Abrasi

Kornea manusia merupakan struktur avaskular transparan yang menutupi bagian depan bola mata, dilapisi epitel skuamosa berlapis dengan ketebalan yang jauh lebih tipis dibandingkan lapisan epidermis kulit pada umumnya. Ketipisan tersebut menjadikan kornea sangat rentan terhadap trauma mekanis, sebab lapisan pelindungnya dapat tergores hanya dengan tekanan ringan dari benda bertepi tajam sekalipun berukuran mikroskopis. Refleksi alami manusia ketika merasakan benda asing di mata adalah mengucek atau menggosok kelopak mata, sebuah respons yang secara paradoksial memperparah cedera apabila pemicunya adalah partikel abu vulkanik yang tajam dan bersudut. Beylin dan kawan-kawan, melalui tinjauan integratif atas berbagai peristiwa letusan gunung berapi, mengidentifikasi sistem okular sebagai salah satu dari tiga sistem jaringan lunak yang paling rentan mengalami cedera langsung akibat ashfall, bersama sistem respiratori dan kulit ¹⁴. Gesekan antara kelopak mata dan partikel kaca silika menimbulkan abrasi kornea, yakni hilangnya sebagian epitel permukaan yang biasanya disertai rasa nyeri hebat, sensasi benda asing, dan produksi air mata berlebih sebagai respons protektif tubuh. Pengguna lensa kontak keras menghadapi risiko abrasi kornea yang lebih tinggi dibandingkan populasi umum, sebab lensa tersebut dapat menjebak partikel abu di antara permukaan lensa dan kornea, memperpanjang durasi kontak antara partikel abrasif dengan jaringan sensitif tersebut ¹⁵. Pemahaman anatomi kornea yang rapuh ini menjadi dasar rekomendasi klinis yang secara tegas melarang tindakan mengucek mata pascapaparan abu vulkanik, meski dorongan refleksif untuk melakukannya kerap sulit ditahan oleh korban di lapangan.

2. Komplikasi Sekunder dan Risiko Gangguan Penglihatan

Luka abrasi pada permukaan kornea membuka jalan bagi mikroorganisme patogen untuk menembus lapisan pelindung epitel yang sebelumnya utuh, meningkatkan risiko infeksi sekunder berupa konjungtivitis iritatif akut maupun keratitis bakterial yang lebih berat.

¹⁴Dmitry Beylin et al., "Soft Tissue-Related Injuries Sustained Following Volcanic Eruptions: An Integrative Review," *Burns* 48, no. 7 (2022): 1729, <https://doi.org/10.1016/j.burns.2021.09.008>.

¹⁵Beylin et al., "Soft Tissue-Related Injuries," 1731.

Peradangan pada konjungtiva, lapisan mukosa tipis yang menutupi bagian putih bola mata dan bagian dalam kelopak mata, umumnya bermanifestasi sebagai kemerahan, pembengkakan, dan keluarnya sekret mata yang disertai rasa gatal dan perih. Fotofobia, yakni nyeri hebat ketika mata terpapar cahaya, kerap menyertai peradangan okular akibat abu vulkanik, sebab reseptor nyeri kornea yang telah teriritasi menjadi hipersensitif terhadap rangsangan cahaya biasa. Toshida dan kawan-kawan, melalui studi eksperimental pada model permukaan okular, menunjukkan bahwa cedera epitel kornea dan konjungtiva cenderung lebih ringan pada mata yang terlindungi lensa kontak lunak dibandingkan mata yang terpapar abu vulkanik secara langsung tanpa pelindung apa pun ¹⁶. Temuan tersebut memberikan implikasi klinis penting bagi kondisi darurat letusan mendadak, ketika evakuasi segera menjadi prioritas yang lebih mendesak dibandingkan pelepasan lensa kontak di lokasi berbahaya. Apabila abrasi kornea tidak ditangani secara adekuat, infeksi sekunder yang berkembang menjadi ulkus kornea berpotensi meninggalkan jaringan parut permanen pada area penglihatan sentral, yang pada kasus berat dapat bermanifestasi sebagai gangguan penglihatan permanen. Risiko inilah yang menjadikan penanganan cedera okular pascapaparan abu vulkanik sebagai kondisi yang membutuhkan perhatian medis segera, sebuah keadaan darurat yang penanganannya tidak patut ditunda hingga fasilitas kesehatan lebih lengkap tersedia.

E. Patofisiologi Sistem Dermatologis

1. Mekanisme Dermatitis Kontak Iritan

Kulit manusia, melalui lapisan epidermis terluarnya yang disebut stratum korneum, berfungsi sebagai penghalang fisik utama terhadap paparan lingkungan, termasuk partikel abrasif dan senyawa kimiawi eksternal. Struktur bergerigi kristal silika pada abu vulkanik mampu menimbulkan mikrolesi pada permukaan stratum korneum ketika bergesekan dengan kulit secara berulang, terutama pada area tubuh yang mengalami gesekan tambahan dari pakaian atau alat pelindung diri. Mikrolesi ini merusak fungsi sawar kulit yang normalnya mencegah kehilangan cairan berlebih dan masuknya mikroorganisme patogen dari lingkungan luar. Keringat yang bercampur dengan residu asam pada permukaan partikel abu, termasuk sulfat dan klorida, mengaktifkan reaksi kimiawi yang menurunkan pH lokal kulit secara drastis dari kondisi normalnya yang sedikit asam menjadi jauh lebih asam. Penurunan pH lokal ini

¹⁶Hiroshi Toshida, Yusuke Matsuzaki, and Masahiro Miyazaki, "Experimental Study on Ocular Surface Protection by Soft Contact Lenses Due to Volcanic Ash Exposure," *Journal of Clinical Medicine* 13, no. 17 (2024): art. 5281, <https://doi.org/10.3390/jcm13175281>.

memicu eritema, yakni kemerahan akut akibat vasodilatasi pembuluh darah superfisial kulit sebagai respons inflamasi terhadap iritan kimiawi. Rasa terbakar dan gatal yang menyertai kondisi ini merupakan hasil rangsangan langsung terhadap reseptor nyeri dan pruritus pada lapisan dermis yang berada tepat di bawah epidermis yang telah rusak. Kombinasi antara trauma mekanis dan iritasi kimiawi inilah yang mendasari diagnosis dermatitis kontak iritan akibat abu vulkanik, sebuah kondisi klinis yang memerlukan penanganan berbeda dari dermatitis kontak alergi biasa.

2. Maserasi, Infeksi Sekunder, dan Populasi Rentan

Lipatan kulit, termasuk area ketiak, selangkangan, dan leher, menghadapi risiko maserasi yang lebih tinggi dibandingkan area kulit datar, sebab kelembapan yang terperangkap pada lipatan tersebut memperlama kontak antara residu asam abu vulkanik dengan permukaan kulit. Maserasi, yaitu pelunakan dan kerusakan jaringan kulit akibat paparan kelembapan berlebih dalam waktu lama, menciptakan pintu masuk tambahan bagi bakteri patogen yang secara normal hidup sebagai flora komensal pada permukaan kulit manusia. Folikel rambut menjadi lokasi yang rentan mengalami infeksi sekunder, sebab partikel abu dapat terperangkap pada muara folikel dan memicu peradangan lokal yang dikenal secara klinis sebagai folikulitis. Beylin dan kawan-kawan mencatat bahwa cedera jaringan lunak akibat letusan gunung berapi, termasuk cedera kulit, kerap terjadi bersamaan dengan cedera pada sistem organ lain, sehingga penilaian klinis menyeluruh diperlukan pada setiap korban yang datang ke fasilitas kesehatan pascaerupsi¹⁷. Anak-anak menghadapi risiko dermatitis yang lebih tinggi dibandingkan orang dewasa, mengingat lapisan epidermis mereka secara fisiologis lebih tipis dan rasio luas permukaan tubuh terhadap berat badan mereka lebih besar. Pasien dengan kondisi kulit dasar seperti dermatitis atopik atau eksem kronis turut menghadapi risiko eksaserbasi yang lebih tinggi, sebab fungsi sawar kulit mereka telah terganggu sebelum paparan abu vulkanik terjadi. Edukasi mengenai kebersihan kulit pascapaparan, termasuk mandi segera dengan air bersih mengalir dan penggantian pakaian yang terkontaminasi abu, menjadi langkah preventif sederhana yang efektif untuk mengurangi risiko dermatitis kontak iritan pada populasi terdampak.

F. Toksisitas Sistemik dan Gastrointestinal: Fluorosis

¹⁷Beylin et al., "Soft Tissue-Related Injuries," 1734.

1. Fluorida Magmatik dan Jalur Kontaminasi

Beberapa tipe letusan gunung berapi melepaskan unsur fluorin dalam konsentrasi tinggi, terutama dalam bentuk gas hidrogen fluorida yang keluar melalui proses degassing magmatik selama fase erupsi maupun pascaerupsi. Linhares, Garcia, dan Rodrigues menjelaskan bahwa fluorin merupakan unsur yang secara alami melimpah pada batuan vulkanik, dan kontaminasi terhadap manusia dapat terjadi melalui uptake langsung gas hidrogen fluorida maupun melalui air hujan dan abu vulkanik yang telah terkontaminasi¹⁸. Partikel abu halus yang melapisi tanaman pangan, rerumputan ternak, dan sumber air minum terbuka menjadi jalur kontaminasi fluorida yang paling signifikan bagi populasi yang bermukim di sekitar gunung berapi aktif. Konsumsi jangka panjang terhadap air atau makanan yang terkontaminasi fluorida dalam konsentrasi tinggi dapat memicu fluorosis, sebuah kondisi toksikologis kronis yang mengganggu metabolisme kalsium normal dalam tubuh manusia. Fluorosis dental, bentuk paparan yang membutuhkan konsentrasi fluorida lebih rendah, bermanifestasi sebagai perubahan warna dan tekstur enamel gigi yang bersifat permanen pada individu yang terpapar selama masa pembentukan gigi. Fluorosis skeletal, bentuk yang lebih berat, membutuhkan paparan kronis pada konsentrasi fluorida yang jauh lebih tinggi dan bermanifestasi sebagai kekakuan sendi, nyeri tulang, serta deformitas struktural pada kasus lanjut. Kondisi nutrisi yang buruk pascabencana, akibat gangguan pasokan pangan dan air bersih, kerap memperparah manifestasi klinis fluorosis pada populasi yang sudah rentan secara sosial ekonomi.

2. Manifestasi Klinis dan Gangguan Gastrointestinal

Manifestasi gastrointestinal akut akibat konsumsi air atau makanan yang terkontaminasi fluorida serta partikel abu vulkanik mencakup mual, muntah, nyeri abdomen, dan diare, gejala yang muncul akibat iritasi langsung mukosa lambung dan usus oleh senyawa asam yang terbawa partikel abu. Linhares, Garcia, dan Rodrigues menekankan bahwa dampak fluorida terhadap kesehatan manusia sangat bergantung pada bentuk kimiawi dan konsentrasinya, sehingga pemantauan biologis menjadi instrumen penting untuk menilai sumber paparan utama pada populasi berisiko tinggi¹⁹. Kasus fluorosis akibat aktivitas

¹⁸Diana Paula Silva Linhares, Patrícia Garcia, and Armindo dos Santos Rodrigues, "Fluoride in Volcanic Areas: A Case Study in Medical Geology," in *Environmental Health—Management and Prevention Practices*, ed. Abdelhadi Makan (London: IntechOpen, 2020), 52, <https://doi.org/10.5772/intechopen.86058>.

¹⁹Linhares, Garcia, and Rodrigues, "Fluoride in Volcanic Areas," 57.

vulkanik telah terdokumentasi pada berbagai wilayah geografis, termasuk populasi yang bermukim di sekitar kawasan vulkanik aktif dengan riwayat erupsi berkepanjangan. Peternakan yang bergantung pada rumput dan air permukaan sebagai sumber pakan utama menghadapi risiko fluorosis pada ternak yang lebih tinggi dibandingkan populasi manusia, sebab hewan ternak mengonsumsi materi tumbuhan yang terkontaminasi dalam jumlah jauh lebih besar per satuan berat badan. Dampak ekonomi dari fluorosis pada ternak turut memperburuk kerentanan sosial ekonomi masyarakat peternak, sebab kematian atau penurunan produktivitas ternak mengurangi sumber penghidupan utama rumah tangga pascabencana. Pemantauan kualitas air minum dan pangan lokal pascaletusan menjadi langkah kesehatan masyarakat yang esensial, khususnya pada wilayah dengan riwayat kandungan fluorida geologis yang telah diketahui tinggi sebelum peristiwa erupsi terjadi. Kolaborasi antara ahli geokimia, dokter spesialis penyakit dalam, dan otoritas kesehatan masyarakat menjadi kunci deteksi dini dan penanganan fluorosis pada populasi yang bermukim permanen di wilayah vulkanik berisiko tinggi.

G. Dimensi Sosiologis: Persepsi Risiko dan Kesiapsiagaan Komunitas

1. Literasi Kesehatan Bencana dan Persepsi Risiko

Ancaman kesehatan abu vulkanik tidak dapat dipahami secara utuh apabila hanya ditinjau dari sudut pandang klinis dan toksikologis, sebab keberhasilan penanganannya pada tingkat populasi amat bergantung pada faktor sosiologis yang membentuk perilaku warga terdampak. Saifudin, melalui studi potong lintang pada komunitas rawan gunung berapi di Yogyakarta, menemukan bahwa literasi kesehatan bencana, persepsi risiko, dan kesiapsiagaan warga secara bersama-sama menjadi prediktor signifikan bagi resiliensi komunitas terhadap ancaman vulkanik²⁰. Literasi kesehatan bencana mencakup pemahaman warga mengenai sifat bahaya abu vulkanik, cara kerja alat pelindung diri, dan langkah pertolongan pertama yang tepat ketika paparan terjadi secara mendadak. Persepsi risiko yang akurat memungkinkan warga menilai secara proporsional tingkat ancaman yang mereka hadapi, tanpa jatuh pada kondisi mengabaikan bahaya secara berlebihan maupun panik yang tidak proporsional terhadap situasi sesungguhnya. Pengalaman kebencanaan sebelumnya turut membentuk persepsi risiko warga secara signifikan, sebab komunitas yang pernah mengalami letusan sebelumnya cenderung memiliki kewaspadaan dan pengetahuan praktis yang lebih matang dibandingkan komunitas yang baru pertama kali menghadapi ancaman serupa. Kesenjangan literasi

²⁰Saifudin, "Disaster Health Literacy."

kesehatan bencana antarkelompok usia, tingkat pendidikan, dan status sosial ekonomi menjadi tantangan tersendiri bagi program edukasi kesehatan masyarakat yang dirancang secara seragam tanpa mempertimbangkan keragaman karakteristik populasi sasaran. Program intervensi kesehatan masyarakat idealnya dirancang secara adaptif, mempertimbangkan karakteristik demografis dan budaya lokal setiap komunitas rawan gunung berapi yang menjadi sasaran edukasi.

2. Komunikasi Risiko dan Koordinasi Kelembagaan

Andreastuti dan kawan-kawan menegaskan bahwa manajemen risiko bencana gunung berapi pada masa krisis membutuhkan komunikasi risiko yang berkesinambungan dan intensif antara ilmuwan, pengambil kebijakan, dan masyarakat terdampak ²¹. Komunikasi risiko yang efektif membutuhkan proses dua arah, sebuah pola jauh melampaui penyampaian informasi searah dari otoritas kepada warga, sebab keterlibatan aktif komunitas dalam pengambilan keputusan terbukti meningkatkan kepatuhan warga terhadap rekomendasi evakuasi dan proteksi kesehatan. Pendekatan yang peka terhadap budaya lokal, termasuk penghormatan terhadap kearifan tradisional dan struktur kepemimpinan komunitas setempat, memfasilitasi hubungan kepercayaan yang kuat antara otoritas kebencanaan dan warga yang menjadi sasaran program mitigasi. Badan penanggulangan bencana nasional Indonesia memiliki fungsi koordinatif untuk menjembatani berbagai lembaga yang menangani aspek ilmiah, sosial, evakuasi, dan rehabilitasi pascabencana, sebuah struktur kelembagaan yang memerlukan sinkronisasi kebijakan pada tingkat nasional, provinsi, dan lokal secara simultan ²². Pengalaman erupsi Gunung Kelud pada tahun 2014 menunjukkan bahwa komunitas dengan otonomi tinggi dan pengalaman kebencanaan sebelumnya mampu melakukan evakuasi mandiri secara cepat sebelum instruksi resmi dari otoritas pusat diterima secara menyeluruh ²³. Temuan ini menegaskan pentingnya investasi jangka panjang pada penguatan kapasitas komunitas, sebuah prioritas yang jauh melampaui langkah mengandalkan sistem peringatan dini terpusat yang bergantung pada kecepatan birokrasi penyampaian informasi. Ketahanan komunitas terhadap bahaya kesehatan abu vulkanik terbentuk dari perpaduan pengetahuan medis yang

²¹ Andreastuti et al., "Volcano Disaster Risk Management during Crisis," 2.

²² Andreastuti et al., "Volcano Disaster Risk Management during Crisis," 5.

²³ Andreastuti et al., "Volcano Disaster Risk Management during Crisis," 9.

akurat, struktur komunikasi risiko yang responsif, dan kepercayaan sosial yang terjalin antara warga dan lembaga penanggulangan bencana setempat.

H. Protokol Proteksi Medis Klinis

1. Eliminasi Filtrasi Rendah dan Pemilihan Respirator

Masker kain dan masker bedah biasa tidak memiliki kerapatan serat yang cukup untuk menahan partikel PM_{2,5} vulkanik, sebuah keterbatasan yang telah dibuktikan secara empiris melalui pengujian efisiensi filtrasi berbagai jenis alat pelindung pernapasan. Mueller dan kawan-kawan, melalui uji laboratorium terhadap tujuh belas material pelindung pernapasan menggunakan abu vulkanik asli dari dua gunung berapi berbeda, menemukan bahwa respirator setara N95 dan N99 mencapai efisiensi filtrasi median di atas sembilan puluh delapan persen, jauh melampaui masker bedah standar yang hanya mencapai delapan puluh sembilan hingga sembilan puluh satu persen²⁴. Material berbahan kain sederhana, termasuk kain bandana yang dilipat berlapis, menunjukkan efisiensi filtrasi yang jauh lebih rendah dan tidak konsisten, bahkan setelah dibasahi dengan air sebagai upaya perbaikan kinerja penyaringan. Temuan ini menegaskan bahwa rekomendasi penggunaan respirator standar N95, KN95, atau FFP2 dengan segel wajah yang telah diuji kerapatannya bukan anjuran teoretis belaka. Rekomendasi tersebut didukung bukti empiris kuantitatif yang dapat diverifikasi. Segel wajah yang tidak rapat, meski material filter respirator memiliki efisiensi tinggi, tetap memungkinkan kebocoran udara yang membawa partikel abu langsung ke saluran napas tanpa melalui proses penyaringan. Steinle dan kawan-kawan, melalui studi simulasi pada sukarelawan manusia, menemukan bahwa respirator setara N95 mencatatkan tingkat kebocoran udara rerata terendah dibandingkan jenis alat pelindung pernapasan lain yang diujikan, meski tanpa pelatihan khusus mengenai cara pemasangan yang benar²⁵. Distribusi alat pelindung diri pascaletusan idealnya disertai edukasi singkat mengenai teknik pemasangan yang benar, mengingat efektivitas respirator amat bergantung pada kerapatan segel wajah, sebuah faktor yang kedudukannya setara penting dengan jenis material penyaringnya.

²⁴William Mueller et al., "The Effectiveness of Respiratory Protection Worn by Communities to Protect from Volcanic Ash Inhalation. Part I: Filtration Efficiency Tests," *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, no. 6 (2018): 972, <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.03.012>.

²⁵Susanne Steinle et al., "The Effectiveness of Respiratory Protection Worn by Communities to Protect from Volcanic Ash Inhalation. Part II: Total Inward Leakage Tests," *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, no. 6 (2018): 981, <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.03.011>.

2. Proteksi Optik Taktis dan Irigasi Tanpa Friksi

Pengguna lensa kontak wajib melepas lensanya secepat mungkin ketika berada di kawasan terdampak ashfall, sebab partikel korosif dapat terperangkap di antara permukaan lensa dan kornea, memperpanjang durasi kontak antara partikel abrasif dengan jaringan mata yang sensitif. Kacamata pelindung tertutup atau goggle yang menutupi area orbital secara menyeluruh direkomendasikan sebagai pengganti kacamata biasa, sebab desain tertutup tersebut mencegah masuknya partikel abu dari celah samping yang umum ditemukan pada kacamata konvensional. Toshida dan kawan-kawan mencatat bahwa dalam situasi letusan mendadak, prioritas evakuasi ke lokasi aman tetap harus didahulukan dibandingkan upaya melepas lensa kontak di tempat yang berbahaya, mengingat waktu yang terbuang dapat meningkatkan risiko cedera dari bahaya vulkanik lain yang lebih mendesak²⁶. Apabila kulit atau mata seseorang terpapar abu vulkanik, tindakan mengusap, menggosok, atau memberikan friksi fisik pada area yang terpapar sangat dilarang, sebab tindakan tersebut justru mendorong partikel abrasif menembus lebih dalam ke jaringan alih-alih mengeluarkannya. Evakuasi material abu dari permukaan mata atau kulit hanya boleh dilakukan melalui irigasi menggunakan aliran air steril atau air bersih mengalir dalam jumlah besar, sebuah teknik yang memanfaatkan gaya hidraulik untuk membilas partikel tanpa menimbulkan gesekan tambahan pada jaringan. Prinsip bedah klasik, *ubi pus, ibi evacua*, di mana ada nanah, di sana keluarkan, secara analogis relevan bagi penanganan mata dan kulit terpapar abu, sebab material asing dan sumber iritasi harus disingkirkan secepat mungkin melalui metode yang tidak menambah kerusakan jaringan. Fasilitas kesehatan primer di wilayah rawan gunung berapi idealnya menyediakan stasiun irigasi mata darurat dan pasokan air bersih dalam jumlah memadai sebagai bagian dari kesiapsiagaan rutin, sebuah langkah proaktif yang kedudukannya melampaui respons reaktif setelah letusan terjadi.

I. Diskusi Interdisipliner

Sintesis atas bukti klinis, toksikologis, geologis, dan sosiologis pada bagian-bagian sebelumnya menegaskan bahwa abu vulkanik merupakan ancaman kesehatan multisistem yang membutuhkan penanganan lintas disiplin, bukan sekadar isu kebersihan lingkungan

²⁶Toshida, Matsuzaki, and Miyazaki, "Experimental Study on Ocular Surface Protection."

pascabencana. Karakteristik fisikokimia abu, mulai dari ketajaman tepi partikel, kandungan silika kristalin, hingga lapisan asam pada permukaannya, menjelaskan mekanisme kerusakan jaringan pada empat sistem organ utama yang telah diuraikan secara rinci. Variasi karakteristik ini antarletusan menegaskan pentingnya karakterisasi mineralogi cepat pascaerupsi, sebuah langkah yang memungkinkan otoritas kesehatan menyesuaikan protokol proteksi sesuai profil bahaya spesifik letusan yang sedang terjadi. Dimensi sosiologis yang diuraikan pada bagian sebelumnya menegaskan bahwa pengetahuan medis yang akurat sekalipun tidak akan efektif tanpa disertai strategi komunikasi risiko yang peka terhadap konteks budaya dan struktur sosial komunitas setempat. Kolaborasi antara vulkanolog, dokter spesialis paru dan mata, ahli kesehatan lingkungan, serta ilmuwan sosial menjadi model kerja yang idealnya diterapkan secara rutin pada wilayah rawan gunung berapi, bukan hanya diaktifkan setelah letusan besar terjadi. Keterbatasan kajian naratif ini perlu diakui secara terbuka, sebab sintesis yang disusun bergantung pada ketersediaan dan kualitas studi primer yang telah dipublikasikan, sementara sejumlah gunung berapi aktif di dunia masih minim data toksikologi dan epidemiologi yang spesifik. Penelitian masa depan idealnya mengarah pada pengembangan basis data mineralogi abu vulkanik yang terstandarisasi secara global, memungkinkan prediksi profil bahaya kesehatan secara lebih cepat dan akurat pascaerupsi di berbagai wilayah geografis.

J. Kesimpulan

Abu vulkanik terbukti secara medis dan geologis merupakan material yang secara fundamental berbeda dari debu pembakaran organik biasa, baik ditinjau dari struktur morfologi partikel, sifat abrasifnya, maupun reaktivitas kimiawi permukaannya. Paparan abu vulkanik menimbulkan trauma mekanis dan reaksi kimiawi pada empat sistem organ utama, yakni sistem respiratori, okular, dermatologis, dan gastrointestinal, dengan mekanisme patofisiologis yang telah diuraikan secara rinci pada bagian-bagian sebelumnya. Ancaman kronis berupa silikosis dan fluorosis menegaskan bahwa dampak kesehatan abu vulkanik tidak berhenti pada fase akut pascaletusan, melainkan dapat berlangsung bertahun-tahun setelah paparan awal terjadi pada populasi yang bermukim permanen di wilayah berisiko tinggi. Dimensi sosiologis, mencakup literasi kesehatan bencana, persepsi risiko, dan komunikasi antarlembaga, terbukti menjadi faktor penentu keberhasilan implementasi protokol proteksi medis pada tingkat populasi. Protokol proteksi klinis yang didukung bukti empiris, mencakup penggunaan respirator

berstandar tinggi dengan segel wajah yang diuji kerapatannya, proteksi optik tertutup, serta teknik irigasi tanpa friksi, terbukti efektif menurunkan risiko cedera akut pada populasi terdampak. Rekomendasi operasional bagi otoritas kesehatan masyarakat mencakup penguatan kapasitas fasilitas kesehatan primer, distribusi alat pelindung diri yang disertai edukasi pemasangan, serta investasi jangka panjang pada program komunikasi risiko yang peka terhadap konteks budaya lokal. Kolaborasi interdisipliner antara kedokteran klinis, vulkanologi, dan sosiologi bencana perlu terus diperkuat, mengingat kompleksitas ancaman abu vulkanik menuntut respons yang melampaui kapasitas satu disiplin ilmu semata. Adagium klasik yang menjadi penutup kajian ini, *vita brevis, ars longa*, hidup itu singkat, ilmu itu panjang, mengingatkan bahwa upaya memahami dan memitigasi bahaya abu vulkanik merupakan proses berkelanjutan yang membutuhkan dedikasi lintas generasi peneliti dan tenaga kesehatan.

Daftar Pustaka

- Andreastuti, Supriyati D., Eko Teguh Paripurno, Subandriyo Subandriyo, Devy Kamil Syahbana, and Ardhy S. Prayoga. "Volcano Disaster Risk Management during Crisis: Implementation of Risk Communication in Indonesia." *Journal of Applied Volcanology* 12, no. 1 (2023): 1–20. <https://doi.org/10.1186/s13617-023-00129-2>.
- Beylin, Dmitry, Ortal Mantal, Josef Haik, Rachel Kornhaber, Michelle Cleary, Amanda Neil, and Moti Harats. "Soft Tissue-Related Injuries Sustained Following Volcanic Eruptions: An Integrative Review." *Burns* 48, no. 7 (2022): 1727–1742. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2021.09.008>.
- Damby, David E., Claire J. Horwell, Peter J. Baxter, Ulrich Kueppers, Max Schnurr, Donald B. Dingwell, and Peter Duewell. "Volcanic Ash Activates the NLRP3 Inflammasome in Murine and Human Macrophages." *Frontiers in Immunology* 8 (2018): 2000. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.02000>.
- Gudmundsson, Gunnar. "Respiratory Health Effects of Volcanic Ash with Special Reference to Iceland: A Review." *Clinical Respiratory Journal* 5, no. 1 (2011): 2–9. <https://doi.org/10.1111/j.1752-699X.2010.00231.x>.
- Horwell, Claire J., and Peter J. Baxter. "The Respiratory Health Hazards of Volcanic Ash: A Review for Volcanic Risk Mitigation." *Bulletin of Volcanology* 69, no. 1 (2006): 1–24. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0052-y>.
- Linhares, Diana Paula Silva, Patrícia Garcia, and Armindo dos Santos Rodrigues. "Fluoride in Volcanic Areas: A Case Study in Medical Geology." In *Environmental Health—Management and Prevention Practices*, edited by Abdelhadi Makan, 51–63. London: IntechOpen, 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.86058>.

- Mueller, William, Claire J. Horwell, Andrew Apsley, Susanne Steinle, Stephanie McPherson, John W. Cherrie, and Karen S. Galea. "The Effectiveness of Respiratory Protection Worn by Communities to Protect from Volcanic Ash Inhalation. Part I: Filtration Efficiency Tests." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, no. 6 (2018): 967–976. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.03.012>.
- Pollard, Kenneth Michael. "Silica, Silicosis, and Autoimmunity." *Frontiers in Immunology* 7 (2016): 97. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2016.00097>.
- Saifudin, I Made Moh. Yanuar. "Disaster Health Literacy, Risk Perception, and Preparedness towards Resilience in a Volcano-Prone Community: A Cross-Sectional Study in Yogyakarta, Indonesia." *Journal of Community Empowerment for Health* 6, no. 3 (2023). <https://doi.org/10.22146/jcoemph.86343>.
- Steinle, Susanne, Anne Sleuwenhoek, William Mueller, Claire J. Horwell, Andrew Apsley, Alice Davis, John W. Cherrie, and Karen S. Galea. "The Effectiveness of Respiratory Protection Worn by Communities to Protect from Volcanic Ash Inhalation. Part II: Total Inward Leakage Tests." *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221, no. 6 (2018): 977–984. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.03.011>.
- Toshida, Hiroshi, Yusuke Matsuzaki, and Masahiro Miyazaki. "Experimental Study on Ocular Surface Protection by Soft Contact Lenses Due to Volcanic Ash Exposure." *Journal of Clinical Medicine* 13, no. 17 (2024): 5281. <https://doi.org/10.3390/jcm13175281>.
- Yang, Bijun, Xiaoman Liu, Cheng Peng, Xiangjing Meng, and Qiang Jia. "Silicosis: From Pathogenesis to Therapeutics." *Frontiers in Pharmacology* 16 (2025): 1516200. <https://doi.org/10.3389/fphar.2025.1516200>.