

Bab IX

Dampak Polusi Udara pada Lingkungan

Lilik Slamet Supriatin

Manusia, hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme berinteraksi secara langsung dengan lingkungan udara atau atmosfer. Walaupun atmosfer tidak menjadi habitat bagi makhluk hidup, kondisi lingkungan udara sangat memengaruhi kualitas dan keberlanjutan lingkungan serta makhluk hidup di dalamnya. Oleh karena itu, perlu sekali untuk menjaga kelestarian dan keasrian lingkungan udara sebagai sumber daya alam kehidupan.

Kualitas lingkungan udara yang sangat buruk juga dapat mengurangi kuantitas spesies makhluk hidup dan mendegradasi lingkungan perairan serta lahan. Polusi udara akan berdampak

L. S. Supriatin

Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: lili012@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Supriatin, L. S. (2026). Dampak Polusi Udara pada Lingkungan. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (179–211). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1813
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

pada kualitas, kuantitas, serta kontinuitas makhluk hidup dan lingkungannya.

Kondisi kualitas lingkungan udara yang buruk dapat berpengaruh, baik langsung maupun tidak langsung pada makhluk hidup. Secara langsung, kualitas lingkungan udara yang buruk dapat merusak sistem pernapasan, sistem transpor, sistem syaraf makhluk hidup (Hourani et al., 2006; Puspitasari & Fauziah, 2023), bersifat karsinogenik (Torjesen, 2015), merusak jaringan kulit, dan merusak jaringan organ penglihatan (Zhang et al., 2020), berpengaruh dan berkontribusi pada iklim (Ivanova, 2020; Pratama & Parinduri, 2019), serta mendegradasi lingkungan perairan dan tanah. Secara tidak langsung, degradasi kualitas lingkungan udara dapat memengaruhi makhluk hidup dengan sebelumnya menurunkan kualitas lingkungan perairan dan tanah yang pada akhirnya akan berdampak buruk pada makhluk hidup. Oleh karena itu, penting sekali untuk mengetahui dampak penurunan kualitas lingkungan udara atau polusi udara pada makhluk hidup dan lingkungannya.

A. Klasifikasi Dampak Polusi Udara

Dampak polusi udara dapat dikategorikan menjadi dampak langsung dan dampak tidak langsung. Klasifikasi ini berdasarkan beberapa kriteria berikut.

- 1) Spasial, yaitu lokasi dan jarak antara sumber polusi udara dan objek yang terkena dampak, termasuk jaraknya terhadap laut.
- 2) Temporal, yaitu waktu yang diperlukan objek untuk terpapar oleh polutan udara.
- 3) Konsentrasi atau kadar dan ukuran partikel (kuantitas) polutan udara.
- 4) Topografi alami atau tekstur dan struktur kota.
- 5) Sirkulasi udara, khusus untuk polusi udara *indoor*.
- 6) Ada tidaknya unsur cuaca, seperti curah hujan, kecepatan angin, dan radiasi matahari.

Jarak antara sumber polutan dan objek terpapar polutan udara dan laut akan memengaruhi cepat atau lambatnya serta langsung atau tidak langsung suatu objek yang terdampak polusi udara. Hal ini karena makin dekat jarak antara sumber polusi dan objek terpapar dengan laut, makin besar angin darat membawa dan mengencerkan polutan udara dari sumbernya ke laut untuk diabsorpsi (serap), sehingga polutan udara dapat dinetralkan oleh laut. Laut adalah salah satu media perosot (*sinker*) yang dapat menyerap polutan udara.

Tekstur suatu kota adalah kasar atau halusnya permukaan suatu kawasan kota. Kota dengan banyak ruang terbuka hijau akan memiliki tekstur kasar sehingga dapat berpotensi meredam polutan udara, baik secara fisik maupun kimiawi. Sebaliknya, kota dengan tekstur halus seperti beton, aspal, dan kaca tidak akan menyerap polutan udara, malahan meneruskan polutan udara dan energi yang dikandung polutan udara.

Struktur kota dengan bangunan rapat dan menjulang tinggi mengakibatkan angin bergerak terbatas sehingga sirkulasi udara kawasan kota terhambat dan tidak dapat mengencerkan polutan udara serta timbulnya panas terasa (*sensible heat*). Struktur kota seperti ini dapat disamakan dengan kondisi topografi berbentuk cekungan. Topografi berbentuk cekungan mengakibatkan polutan udara yang sudah masuk ke bentang alam tersebut akan tertahan (*stagnan*) dan tidak dapat keluar sehingga terjadi akumulasi polutan udara yang membahayakan makhluk hidup.

Dampak langsung polusi udara dari sisi temporal artinya manusia atau objek tidak akan membutuhkan waktu lama untuk terkena dampak emisi polutan udara. Hal ini karena dari sisi spasial, lokasi antara sumber emisi polutan udara dan makhluk hidup atau objek memiliki jarak yang relatif dekat. Polutan udara tidak memerlukan waktu lama untuk mencapai sasaran, baik makhluk hidup maupun objek lain yang akan terkena dampak polusi udara.

Dampak langsung polusi udara juga dipengaruhi oleh kadar polutan udara yang relatif tinggi dan ukuran partikel polutan

udara yang relatif kecil. Intensitas waktu terpapar polutan udara relatif tinggi, serta topografi alami yang berbentuk datar, struktur kota yang menghambat sirkulasi udara, tekstur kota yang halus, jarak antara objek dan sumber polutan dengan laut yang relatif jauh, dan unsur cuaca yang bersifat tidak mendukung penyebaran polutan udara yang meliputi hujan, kecepatan angin relatif rendah, dan intensitas radiasi matahari yang kurang juga memengaruhi dampak langsung polusi udara.

Berkenaan dengan dampak tidak langsung polusi udara, faktor yang berpengaruh sama dengan dampak langsung, tetapi memiliki karakteristik yang berbeda sebagai berikut.

- 1) Spasial, yaitu jarak antara lokasi sumber emisi polutan udara dan objek relatif jauh, bahkan dapat bersifat *long range transport air pollution* (transportasi polutan yang memiliki jarak antara sumber polusi udara dan daerah terkena dampak melebihi jarak 100 km) dan *transboundary pollution* (melintasi batas administrasi suatu negara); serta jarak antara sumber polutan dan objek dengan laut relatif dekat.
- 2) Temporal, yaitu objek terpapar polutan udara sampai terdampak memerlukan waktu relatif lama.
- 3) Konsentrasi polutan udara rendah.
- 4) Topografi alami berbentuk cekungan.
- 5) Terdapat unsur cuaca yang bersifat mendukung penyebaran dan pengenceran polutan udara, karena adanya hujan, kecepatan angin relatif tinggi, dan radiasi matahari kuat.

Dampak polusi udara secara keseluruhan tidak hanya dirasakan pada lingkungan udara atau atmosfer saja, tetapi juga pada lingkungan perairan (badan air dan laut) serta lahan. Selain itu, beberapa sektor kehidupan, seperti kesehatan, transportasi, pendidikan, pariwisata, perikanan, pertanian, dan energi juga dapat terdampak negatif. Adanya zat pencemar berupa gas mengakibatkan komposisi dari atmosfer tidak standar lagi sehingga polusi udara juga dapat mengubah distribusi aliran massa dan energi serta

neracanya. Sebagian besar dampak polusi udara akan berkaitan dengan aspek kesehatan.

Kusnoputranto dan Susanna (2000) memperkirakan bahwa di Indonesia ke depan akan terdapat dua pola penyakit, yaitu penyakit yang disebabkan infeksi oleh mikroorganisme dan penyakit yang disebabkan oleh *non-living organism*, yaitu penyakit yang disebabkan oleh zat-zat kimia, salah satunya akibat dampak polusi udara.

Polutan udara secara langsung dapat berdampak pada kesehatan manusia melalui jalan masuk ke pancaindra. Selain secara langsung, polutan udara dapat secara tidak langsung masuk ke manusia melalui makanan berupa buah dan sayuran yang dikonsumsi mentah atau tanpa pengolahan terlebih dahulu.

Budidaya tanaman buah dan sayuran dengan cara penyemprotan pestisida dan/atau insektisida yang tidak sesuai prosedur dan takaran (dosis) dengan tujuan hanya untuk memperoleh komoditas yang tampak luarnya berkualitas tinggi akan mengakibatkan adanya kandungan bahan kimia dalam buah dan sayuran yang berbahaya bagi kesehatan konsumen.

Penyakit di Indonesia selain penyakit karena bakteri, jamur, dan virus (penyakit karena *living organism*), juga disebabkan oleh zat kimia dalam bentuk polutan udara (*non-living organism*). Perubahan iklim juga turut memicu kedua jenis penyakit tersebut. Penyakit jenis pertama yang disebabkan oleh bakteri, jamur, dan virus dijelaskan oleh model ekologi Bahn dan Mausner (1974) dalam Iffani et al. (2019) yang menyatakan bahwa penyakit dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu *host* (penjamu), agen (penyebab), dan lingkungan. Faktor lingkungan di sini mencakup iklim dan perubahannya serta kondisi kualitas lingkungan termasuk polusi udara.

Dampak polusi udara pada makalah ini mencakup dampak terhadap visibilitas, cuaca dan iklim, kualitas hujan, serta iklim perkotaan (Godish, 2003). Sebagai tambahan juga akan diuraikan dampak bising, polusi cahaya, dan dampak polusi udara pada bau.

B. Dampak Polusi Udara pada Visibilitas dan View Kota

Polutan udara berdampak pada visibilitas atau jangkauan daya penglihatan yang dipengaruhi secara fisik dan kimia. Secara fisik, ukuran diameter partikel dari polutan udara memengaruhi visibilitas. Partikel polutan udara yang berdiameter sama dengan panjang gelombang cahaya tampak ($0,4\text{--}0,7\ \mu\text{m}$) akan efektif menghamburkan cahaya sehingga daya visibilitas di lokasi terpolusi oleh partikel yang berdiameter lebih kecil dari $2,5\ \mu\text{m}$ akan menurun dan lebih berbahaya dibandingkan PM_{10} (Godish, 2003).

Sementara itu, secara kimia, polutan udara dapat menyerap cahaya matahari sehingga visibilitas menurun. Penghamburan cahaya dipengaruhi oleh komposisi kimia polutan udara jenis aerosol (partikel padat atau cair yang terdispersi dalam medium gas atau udara). Komposisi kimia yang berbeda dari aerosol akan menghasilkan penghamburan radiasi matahari kembali ke ruang angkasa yang berbeda pula. Ukuran, konsentrasi, dan distribusi dari polutan udara jenis aerosol akan memengaruhi pembentukan awan dan visibilitas. Makin banyak awan terbentuk, visibilitas menurun, tetapi kejadian hujan meningkat.

Polutan udara jenis aerosol adalah pendingin atmosfer yang bersifat menyeimbangkan pemanasan oleh gas rumah kaca (GRK). Aerosol sulfat yang bersifat higroskopis akan menyerap cahaya lebih efisien.

Polutan udara jenis NO_2 (nitrogen dioksida) menyerap cahaya dengan panjang gelombang relatif pendek seperti cahaya biru, tetapi setelah itu akan memantulkan cahaya dengan panjang gelombang yang relatif lebih panjang (cahaya kuning) ke mata (Godish, 2003). Adanya polutan udara jenis NO_2 dengan konsentrasi tinggi pada udara ambien akan mengakibatkan *view* dari langit berwarna lembayung (kuning kecokelatan) yang akan mengakibatkan mata menjadi iritasi dan sakit

Di pedesaan (kawasan rural), dampak polutan udara berupa penurunan visibilitas berasal dari erupsi gunung api serta kebakaran

hutan dan lahan. Walaupun polutan udara dari kebakaran hutan dan lahan bersumber di kawasan *rural*, penyebaran *smoke* dan dampaknya dapat mencapai jarak yang jauh dari sumber polusinya, bahkan sampai melintasi batas antarnegara (*long transboundary layer*).

Dampak polusi udara dari kebakaran hutan dan lahan atau dari badai debu serta pasir sering kali mengakibatkan hubungan kedua negara yang saling berbatasan, baik batas darat maupun laut, menjadi kurang harmonis. Sementara itu, di kawasan perkotaan (*urban*), penurunan visibilitas karena polusi udara disebabkan oleh industri dan transportasi.

Secara alami, ketika erupsi gunung api terjadi, debu vulkanik akan berdampak pada jangkauan jarak pandang. Umumnya, hal tersebut berdampak pada sektor transportasi, khususnya penerbangan, yakni visibilitasnya hanya beberapa meter saja sehingga membahayakan keselamatan (USGS, 2010).

Kebakaran hutan dan lahan yang ekstrem juga dapat menurunkan visibilitas sehingga jarak pandang tidak sampai puluhan meter. Partikulat atau debu juga merupakan sumber utama *haze* (kabut asap) yang dapat menurunkan visibilitas atmosfer.

Soedomo (2001) menyatakan bahwa dampak debu pada visibilitas atmosfer mulai timbul jika konsentrasinya dalam atmosfer sudah mencapai $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Kebakaran hutan tidak saja berdampak pada visibilitas, tetapi juga berdampak pada hewan-hewan di hutan yang menjadikan hutan sebagai habitat akan kehilangan tempat tinggalnya serta berpotensi terancam punah.

Punahnya hewan herbivora yang berhabitat di hutan akan mengakibatkan efek domino pada populasi hewan karnivora yang juga berkurang, bahkan akan punah. Kebakaran hutan dan punahnya hewan herbivora dan karnivora menyebabkan detritivor atau pengurai memiliki populasi yang makin besar sehingga unsur anorganik sebagai hasil kerja pengurai akan

makin besar jumlahnya. Manusia tidak dapat secara langsung memakan unsur anorganik sehingga akibat akhir dampak polusi udara adalah punahnya manusia.

Tabel 9.1 berikut menyajikan pengaruh dari jenis polutan udara terhadap persentase visibilitas yang dilakukan penelitiannya di Amerika Serikat (USA). Berdasarkan Tabel 9.1 diketahui bahwa jenis polutan udara yang berbahaya dan menurunkan visibilitas adalah elemen karbon termasuk partikel *black carbon* sebesar 85% sampai dengan 95% di kedua lokasi penelitian. Posisi kedua, jenis polutan udara yang menurunkan visibilitas adalah jenis polutan nitrat (NO_3^-) sebesar 55% sampai dengan 95%.

Tabel 9.1 Persentase Visibilitas Akibat Pengaruh Jenis Polutan Udara

No.	Jenis Polutan Udara	Bagian Timur USA	Bagian Barat USA
1.	Sulfat	20–40	35–75
2.	Karbon organik	70–90	65–85
3.	Nitrat	85–95	45–95
4.	Elemen karbon	85–95	85–95

Sumber: USEPA (2000)

Selain dampak polutan udara terhadap visibilitas, polutan udara juga akan tampak pengaruhnya pada *view* atau kenampakan suatu kota. Daerah dengan polusi udara ringan sangat sukar dideteksi dengan kasatmata saja, tetapi dapat dideteksi oleh instrumen pengukur emisi dan konsentrasi polutan udara.

Berbeda dengan polusi udara, polusi air lebih mudah dideteksi karena kontaminan dengan konsentrasi rendah sekalipun sudah dapat mengubah warna air dari warna semula. Hal ini karena polusi udara terdiri atas sejumlah gas polutan udara yang bersifat tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, terutama pada konsentrasi relatif rendah, contohnya adalah gas CO (Godish, 2003).

Kota yang sudah mengalami polusi udara yang parah akan terindikasi dari berkurangnya jarak pandang (*visibility*) terhadap cakrawala. Berdasarkan tingkat polusi udara, *view* suatu kota dapat dikelompokkan menjadi *gray air cities* dan *brown air cities*.

Gray air cities adalah kota-kota yang memperlihatkan cakrawala langitnya didominasi oleh langit berwarna abu-abu. Kota dengan cakrawala langit berwarna abu-abu ini disebabkan polutan udara jenis belerang atau sulfur oksida (SO_2 dan SO_4) berkonsentrasi tinggi. Kota *gray air cities* ini disebabkan oleh dominasi transportasi berbahan bakar solar atau bahan bakar bensin dengan kadar belerang relatif tinggi (0,5–5% massa), rumah tangga yang menggunakan batu bara untuk energi bahan bakar memasak, pembangkit listrik tenaga uap, kawasan pabrik dan industri yang menggunakan bahan bakar batu bara dan menggunakan sulfat sebagai bahan baku industrinya.

Warna abu-abu ini berasal dari *smog* (kabut asam di atmosfer dari asam sulfat) yang akan berdampak pada korosi bahan logam, menyebabkan iritasi mata, dan merusak paru-paru. Kota-kota yang berpotensi terbentuknya *gray air cities* (*industrial smog*) adalah kota dengan iklim dingin atau basah/hujan (Kusnopranto & Susanna, 2000).



Sumber: Yang et al (2021)

Gambar 9.1 Cakrawala Langit dengan *Gray Air Cities*

Berdasarkan Gambar 9.1, tampak sebuah kota dengan cakrawala yang berwarna keabu-abuan yang terpolusi berat oleh

polutan sulfat. Oleh karena itu, dahulu terdapat program “Langit Biru” yang dicanangkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) untuk menciptakan kota yang minim polutan udara. Konsentrasi aerosol membuat langit pada siang hari tampak lebih putih. Kenampakan warna langit dipengaruhi oleh panjang gelombang radiasi yang dipancarkan dari permukaan. Polutan udara yang dihasilkan oleh aktivitas industri, transportasi, erupsi gunung, serta kebakaran hutan dan lahan memancarkan radiasi gelombang panjang yang menyebabkan langit tidak berwarna biru, tetapi lebih ke arah warna putih atau jingga yang secara langsung membuat mata sakit.

Brown air cities adalah kota-kota yang cakrawala langitnya didominasi oleh langit berwarna coklat kekuningan. Kota dengan cakrawala langit berwarna coklat ini disebabkan polutan udara jenis nitrogen oksida (NO_x) berkonsentrasi tinggi. Kota *brown air cities* ini disebabkan oleh dominasi transportasi kendaraan bermotor berbahan bakar fosil jenis bensin dengan kadar belerang relatif rendah. *Brown air cities* terjadi melalui proses fotokimia dengan bantuan radiasi sinar matahari berintensitas relatif tinggi. *Brown air cities* hanya dapat terjadi di iklim tropis dengan intensitas radiasi tinggi sepanjang tahun (terutama pada musim kemarau) dan iklim subtropis pada musim panas (*summer*) dan saat terjadinya gelombang panas. Dampak *brown air cities* ini di samping menghasilkan bau yang tidak sedap juga dapat merusak saluran pernapasan, menyebabkan iritasi pada paru-paru dan mata, dan berkontribusi pada kerusakan jantung, hati, dan ginjal (Kusnopranto & Susanna, 2000).



Sumber: Yang et al (2021)

Gambar 9.2 Kota dengan cakrawala *Brown Air Cities*

Berdasarkan Gambar 9.2, tampak pemandangan langit di kota berwarna cokelat kekuningan. Hal ini menunjukkan kadar polutan oksida nitrogen yang sudah berkonsentrasi tinggi. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan juga mencanangkan Program Kampung Iklim (Proklam) yang membina banyak desa untuk tanggap terhadap perubahan iklim dan polusi udara. Melalui program ini, desa-desa dibina untuk memitigasi polutan udara dan perubahan iklim dengan menanam pohon, reboisasi, mengelola sampah, memanen air hujan, serta mengonservasi tanah dan air.

C. Dampak Polusi Udara pada Cuaca dan Iklim

Selain abu vulkanik, erupsi gunung api melepaskan polutan udara jenis aerosol. Sejak abad ke-19, tercatat ada empat erupsi gunung api terbesar di dunia, yaitu erupsi Gunung Tambora (Nusa Tenggara Barat) pada tahun 1815, erupsi Gunung Krakatau (Selat Sunda) pada tahun 1883, erupsi Gunung El Chichón (Meksiko) pada tahun 1982, dan erupsi Gunung Pinatubo (Filipina) pada tahun 1991. dan

dua erupsi gunung api terdapat di Indonesia, dan. Keempat erupsi gunung api ini mengubah cuaca dan iklim dunia.

Aerosol polutan udara sulfat yang dilepaskan oleh erupsi gunung api sampai terlontar jauh lintas batas negara, bahkan benua. Erupsi Gunung Tambora yang terjadi pada tahun 1815 mengakibatkan benua Eropa tidak mengalami musim panas. Salah satu faktor yang diduga berkontribusi pada kekalahan Napoleon Bonaparte adalah cuaca ekstrem yang dipicu oleh erupsi Gunung Tambora, yang mengubah perkiraan cuaca musim panas menjadi musim dingin

Erupsi gunung Krakatau bahkan letusan dan debunya sampai ke negara Sri Lanka. Erupsi Gunung El Chichón dan Pinatubo menyebabkan pendinginan dunia selama beberapa tahun (Graves & Reavey, 1996). Hal ini karena aerosol sulfat adalah inti kondensasi untuk pembentukan awan-awan hujan. Erupsi gunung api yang hebat dapat memperpanjang musim penghujan dan periode La Nina serta memperpendek periode El Nino.

Dampak polutan udara dari erupsi gunung api terhadap cuaca dan iklim dipengaruhi oleh *Volcanic Explosivity Index* (VEI), yaitu angka tidak bersatuan yang menyatakan kekuatan dari erupsi suatu gunung api. Makin besar nilai VEI, makin tinggi kepulan asap dan awan panas serta luas area penyebaran emisi polutan udaranya. Tabel 9.2 menyajikan nilai VEI dari beberapa gunung api di Indonesia yang pernah erupsi.

Tabel 9.2 Nilai VEI Beberapa Erupsi Gunung di Indonesia

Nama gunung api	Tanggal erupsi	Nilai VEI
Merapi	8 November 2010	4
Kelud	Maret 1990	4
Colo	Desember 1983	4
Galunggung	8 Januari 1983	4
Agung	27 Januari 1964	5
Krakatau	Agustus 1883	6

Sumber: Supriatin (2017)

Berdasarkan Tabel 9.2 dapat diketahui bahwa VEI dari erupsi Gunung Krakatau adalah yang paling tinggi. Walaupun nilai VEI dari beberapa erupsi gunung api di Indonesia sebagian besar adalah 4, tinggi letusan maksimum dan area penyebaran polutan udara dipengaruhi oleh ketinggian gunung dari permukaan tanah, topografi, serta faktor meteorologi terutama arah dan kecepatan angin, hujan, kelembapan udara, dan radiasi matahari saat erupsi gunung. Ketinggian gunung dapat disamakan dengan ketinggian cerobong asap pada pabrik.

Selain aerosol sulfat, erupsi gunung api juga melepaskan CO (karbon monoksida) dan H_2S (asam sulfida). Richard et al. (1987) menyatakan besarnya emisi SO_2 menempati 9% dari emisi total erupsi gunung api. Ditambahkan oleh Sawyer et al. (2008) bahwa persentase dari senyawa-senyawa gas tersebut tidak selalu sama untuk setiap gunung dan ketika kejadian letusan gunung api.

Selain berpengaruh pada kuantitas curah hujan, adanya aerosol sulfat juga berdampak pada kualitas curah hujan, yaitu hujan asam. Berdasarkan kualitasnya, curah hujan dikelompokkan ke dalam hujan asam, hujan basa, dan hujan netral (Alfiandy et al., 2021).

Aerosol sulfur yang dilepaskan ke atmosfer akan membentuk SO_2 . Sulfur dioksida (SO_2) teroksidasi di atmosfer membentuk SO_3 (sulfur trioksida). Gas SO_3 bersifat mudah larut dalam air sehingga pada udara lembap (udara yang banyak mengandung uap air) menghasilkan asam sulfat (H_2SO_4). Uap air yang telah mengandung H_2SO_4 ini merupakan bagian dari awan dan selanjutnya akan berkondensasi, lalu turun sebagai hujan yang airnya bersifat asam dengan pH atau derajat kemasaman kurang dari 5,6.

D. Dampak Polusi Udara pada Kualitas Hujan

Air hujan memiliki aspek kuantitas dan kualitas. Aspek kuantitas curah hujan mencakup tinggi atau tinggi curah hujan yang bersatuan mm, durasi (lama) hujan, dan intensitas hujan (mm/jam). Sementara itu, aspek kualitas curah hujan mencakup derajat kemasaman air hujan (pH) dan ukuran diameter butir hujan.

Dalam ilmu lingkungan, dikenal istilah deposisi atmosfer, yaitu partikel yang mengendap di atmosfer. Deposisi atmosfer dapat dibedakan menjadi deposisi kering, yaitu partikel padat yang tersuspensi dalam atmosfer yang berupa gas, serta deposisi basah, yaitu ketika materi deposisi kering tersebut sudah terlarut dalam air hujan. Secara fisik, deposisi kering berbentuk debu; secara kimia, debu tersebut mengandung zat kimia polutan udara.

Deposisi atmosfer ini juga dapat ditinjau dari sisi biologi. Deposisi atmosfer juga dapat membawa mikroorganisme patogen (merugikan) yang dapat menimbulkan penyakit ketika mengendap di permukaan.

Bakteri adalah mikroorganisme yang bersifat ubiquitus, yang berarti jumlahnya sangat berlimpah secara kuantitas. Madigan et al (2009) menyatakan bahwa total jumlah bakteri yang mendiami bumi sebesar 5×10^{30} . Selain itu, bakteri dapat ditemukan di hampir semua tempat di dunia, baik di darat, laut, maupun udara atau hidup sebagai parasit pada makhluk hidup lain (inangnya) (Supriatin, 2014). Beberapa komunitas bakteri juga dapat hidup di dalam awan sampai ketinggian 10 km dari permukaan.

Deposisi kering mengandung SO_2 , Ozon, dan NO_2 . Baik deposisi kering maupun deposisi basah, berbahaya. Dampak deposisi kering adalah pada sistem pernapasan, mata, dan kulit.

Deposisi kering dengan ukuran partikel lebih kecil dari $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$), jika terhirup saat bernapas, akan menurunkan fungsi paru-paru. *Silicosis* adalah penyakit karena terhirupnya debu silika bebas (SiO_2) ke dalam paru-paru.

Deposisi kering yang mengenai kulit akan menimbulkan iritasi dan gatal pada kulit. Deposisi kering yang dilepaskan dari erupsi gunung api berupa debu silikat yang berbentuk runcing akan berbahaya jika masuk ke dalam mata.

Deposisi kering juga berpengaruh pada keanekaragaman hayati. Karena terpapar polusi udara dalam jangka waktu yang lama, vegetasi di Pegunungan San Bernardino di bagian Selatan California, berubah dari komunitas pohon pinus yang sebagian

besar mati menjadi komunitas pohon *oak* dan semak belukar (Barker & Tingey, 1992, sebagaimana dikutip dalam Liu & Liptak, 1999). Perubahan komunitas ini disebabkan adanya polutan udara jenis oksidan fotokimia.

Dampak dari deposisi basah polutan udara adalah berupa hujan asam. Secara alami dan netral, derajat kemasaman air hujan (pH) adalah sebesar 5,6. Hujan asam adalah air hujan dengan pH lebih kecil dari 5,6. Hujan basa memiliki pH di atas 5,6 (Alfiandy et al., 2021).

Robert Angus Smith, seorang ilmuwan berkebangsaan Inggris, adalah orang pertama yang menghubungkan antara pencemaran udara dan dampaknya berupa hujan asam, pada tahun 1852. Dua puluh tahun kemudian (1872), Robert Angus Smith menemukan untuk pertama kalinya hujan asam di Kota Manchester (Inggris) yang disebabkan industrialisasi pada masa revolusi industri (Mehta, 2010).

Hujan asam dapat terjadi, baik alami maupun antropogenik (hasil kegiatan manusia). Secara alami, hujan asam dapat terjadi akibat erupsi (letusan) gunung api, proses biologis dalam tanah, rawa dan laut (Agustiarni, 2008; Mehta, 2010).

Erupsi gunung api salah satunya melepaskan gas nitrogen dioksida (NO_2) dan sulfur dioksida (SO_2) yang merupakan gas-gas pembentuk air hujan asam (Sumaryati, 2014). Hujan asam terjadi jika di atmosfer terdapat bahan polutan udara berupa SO_2 dan NO_x yang bereaksi dengan H_2O (titik-titik air dalam awan) membentuk H_2SO_4 (asam sulfat) dan HNO_3 (asam nitrat).

Asam nitrat (HNO_3) berasal dari NO_x yang terjadi pada suhu tinggi di dalam mesin kendaraan bermotor. Sementara itu, SO_2 berasal dari industri, kendaraan bermotor, dan erupsi gunung api. Hujan asam berdampak negatif pada lingkungan air dan daratan. Air hujan dengan pH lebih kecil dari 5,6 akan berakibat buruk pada properti, monumen, dan ekosistem (terutama lingkungan badan air dan tanah/lahan), serta kesehatan manusia (Wardhana, 1995).

Pada properti dan material yang terbuat dari logam, hujan asam akan berdampak pada korosi (karat). Hujan asam dapat merusak material logam, meskipun sudah dilapisi (digalvanisasi) atau berbahan nikel. Bahkan, baja yang telah dicat, kayu yang dicat, dan patung juga dapat terkena korosi akibat hujan asam. (Glass et al., 1979).

Peter et al. (2018) menyatakan bahwa partikel polutan udara dan hujan asam menyebabkan korosi pada peralatan logistik dan kendaraan militer. Peralatan elektronik dapat juga terdampak oleh polutan udara karena bersifat partikel mikroskopis yang dapat merusak sirkuit dan komponen elektronik (Abbasi et al., 2013)

Air hujan asam yang meresap ke dalam tanah akan memengaruhi komposisi kimia tanah, menyebabkan *leaching* (pencucian unsur hara dalam tanah), dan mengubah pH tanah. Perubahan pH tanah dapat menyebabkan perubahan pada pola adsorpsi (penyerapan) dan desorpsi (pelepasan) kation dalam tanah.

Hujan asam dapat menurunkan pertumbuhan vegetasi dan bahkan kematian vegetasi hutan (Liu & Liptak, 1999). Cowling dan Davey (1981) menyatakan bahwa hujan asam yang jatuh di daun akan mengelupaskan lapisan lilin pada daun sehingga air hujan tidak dapat tertahan pada daun dan langsung menjadi air hujan yang menyusuri batang pohon dan berakhir menjadi air limpasan yang mengerosi tanah. Wetstone dan Foster (1983) menyatakan bahwa di Jerman terdapat kerusakan 560.000 ha hutan akibat hujan asam.

Hujan asam juga dapat menyebabkan patogen menjadi resisten, menurunkan laju penguraian sampah daun, mempercepat kematian benih, dan mengakumulasi logam berat dalam tanah (Cowling & Davey, 1981). Ditambahkan oleh Cowling dan Davey (1981) bahwa hujan asam dapat menghambat proses mikrobiologi seperti fiksasi nitrogen, mineralisasi sampah hutan, dan nitrifikasi amonium.

Hujan asam dapat menyebabkan peningkatan mobilisasi aluminium dan *leaching* dari tanah menuju sistem akuatik atau badan air seperti sungai dan danau atau waduk (danau buatan). Hujan asam ini juga dapat menggantikan asam karbonik di dalam

tanah dengan asam sulfat. Hujan asam juga dapat mempercepat pencucian kation nutrisi (unsur hara) dari tanah hutan dan dapat mengancam pengurangan sumber kalium tanah.

Hujan asam berdampak pada perubahan komposisi kimia air dan perairan yang turunannya berakibat pada flora dan fauna yang berhabitat di lingkungan perairan tersebut. Wright dan Gjessing (1976) telah mencatat bahwa hujan asam yang jatuh ke danau menyebabkan konsentrasi aluminium, mangan, dan logam berat lain meningkat tinggi. Sementara itu, Hendry et al. (1976) menyatakan bahwa hujan asam mengakibatkan penurunan jumlah dekomposer (bakteri pengurai), *algae* (ganggang), zooplankton, bentos (plankton yang terdapat di dasar perairan), dan ikan.

Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas, 2006) dalam laporannya menyatakan bahwa hujan asam atau deposisi asam telah berkontribusi sebesar 30% terhadap penurunan keanekaragaman hayati, sedangkan perubahan iklim menyumbangkan sebesar 8% untuk penurunan yang sama.

E. Dampak Polusi Udara di Perkotaan

Dampak polusi udara di kota mencakup terjadinya inversi, pulau panas perkotaan, dan potensi kejadian puting beliung. Terdapat tiga bentuk inversi pada atmosfer yaitu inversi karena radiasi, inversi karena subsidensi, dan inversi frontal.

Inversi karena radiasi disebut juga dengan inversi suhu. Inversi suhu sering terjadi di kota besar. Hal ini karena pada kondisi normal atau tidak, ada industri atau tidak, dan ada kegiatan transportasi yang bekerja *nonstop* (24 jam), pada malam hari, di permukaan kota akan terjadi pendinginan karena pelepasan radiasi gelombang panjang dari permukaan. Sebaliknya, pada kota dengan industri dan transportasi yang tidak tidur, emisi polutan udara terus diproduksi dari pabrik dan kendaraan bermotor selama 24 jam.

Cerobong asap dari pabrik dan knalpot kendaraan bermotor tidak saja melepaskan polutan udara, tetapi juga melepaskan bahan

yang bersifat panas. Dengan demikian, kota akan memiliki suhu relatif tinggi dan menjadi terasa lebih panas.

Inversi suhu berarti kondisi yang berbanding terbalik antara suhu udara di permukaan dan suhu udara di lapisan atas permukaan. Seharusnya, pada malam hari, kondisi di permukaan lebih dingin (suhu udara lebih rendah) daripada kondisi di bagian lapisan yang lebih atas. Liu dan Liptak (1999) menyatakan bahwa polutan udara yang dilepaskan selama malam hari menjadi penyebab inversi radiasi ini. Inversi radiasi ini banyak terjadi di iklim tropis dengan topografi datar atau terjadi pada kota-kota yang dibangun pada dataran rendah, seperti Jakarta, Semarang, dan Surabaya.

Inversi suhu ini dalam kurun waktu kejadian yang relatif lama akan berakibat terbentuknya pulau panas perkotaan (*urban heat island*). Tekstur kota yang bersifat halus dan sebagian besar permukaannya terbuat dari aspal dan beton menyebabkan radiasi tidak dapat diserap, tetapi sebaliknya semua radiasi dipantulkan (albedo makin besar) dan berakibat panas makin terasa. Selain itu, tekstur kota yang didominasi aspal dan beton juga tidak dapat menyerap air. Sedikit air hujan yang terserap menjadikan iklim kota bersifat kering dan panas.

Kemacetan kendaraan bermotor menyebabkan polutan udara terakumulasi di jalan beraspal sehingga menaikkan suhu udara. Kawasan dengan kondisi jalan yang macet, didominasi jalan beraspal, permukaan gedung berbeton serta kaca, sedikit ruang terbuka hijau, tidak ada badan air, baik buatan maupun alami, dan jauh dari laut, kawasan tersebut berpotensi menjadi pulau panas perkotaan.

Selain menyebabkan pulau panas perkotaan, polusi udara di kawasan perkotaan juga berpotensi menimbulkan angin puting beliung. Perbedaan suhu yang menyebabkan terjadinya selisih tekanan udara di permukaan dan lapisan di atasnya mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi.

Inversi subsiden terjadi pada kota yang dibangun pada cekungan topografi (Cooper & Alley, 1986, sebagaimana dikutip dalam Liu

& Liptak, 1999). Istilah subsiden mengacu pada bagian tanah yang lebih rendah atau turun. Dengan demikian, subsiden dapat diartikan sebagai lokasi dengan kondisi topografi cekung yang di sekelilingnya terdapat perbukitan atau pegunungan. Bandung, Bogor, dan Malang adalah contoh kota yang dibangun pada cekungan topografi. Ketiga kota dikelilingi oleh pegunungan sehingga kota-kota tersebut terletak lebih rendah dan berbentuk cekungan.

Polutan udara yang terkumpul di cekungan topografi tidak dapat menyebar dan terakumulasi di sekitar cekungan topografi. Sementara itu, polutan udara yang berasal dari perbukitan dan pegunungan sekitarnya menuju ke cekungan topografi. Kota yang dibangun pada cekungan topografi akan dipenuhi polutan udara, terlebih sebagian besar kota di cekungan topografi adalah daerah wisata yang banyak dikunjungi wisatawan pada akhir pekan dan libur panjang. Para wisatawan dengan kendaraan bermotornya banyak melepaskan polutan udara ke cekungan topografi ini. Akibatnya, konsentrasi polutan udara menjadi tinggi dan berbahaya bagi kesehatan. Hal ini karena polutan udara akan terakumulasi dalam jumlah relatif besar dan hanya dengan kecepatan angin relatif tinggi polutan udara di cekungan topografi dapat terdispersi baik sehingga berkonsentrasi rendah.

Inversi subsiden yang terjadi dalam periode waktu tertentu berpotensi terjadinya angin puting beliung. Selisih tekanan udara yang sangat besar antara permukaan cekungan topografi dan lapisan di atasnya dan sekelilingnya yang berupa pegunungan dan perbukitan mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi. Selain itu, kondisi cekungan topografi yang sangat jauh dari laut menyebabkan angin lokal (angin darat dan angin laut) tidak bekerja. Padahal, angin lokal tersebut berpotensi melemahkan kekuatan angin puting beliung.

Menurut hipotesis penulis, terjadinya angin puting beliung berdampak positif pada penyebaran polutan udara. Adanya angin puting beliung mengakibatkan polutan udara yang terakumulasi di cekungan topografi akan terdispersi baik sehingga berkonsentrasi

rendah dan tidak membahayakan kesehatan makhluk hidup yang tinggal di kawasan cekungan topografi tersebut. Hipotesis ini perlu dibuktikan dengan penelitian lebih lanjut karena banyak peristiwa puting beliung terjadi di Bandung yang merupakan kawasan cekungan topografi. Selain dampak berupa terjadinya angin puting beliung karena inversi subsiden, inversi jenis ini memungkinkan juga berpotensi terjadinya fenomena pulau panas perkotaan (*urban heat island*).

Inversi jenis terakhir adalah inversi frontal. Inversi ini terjadi secara alami pada daerah berlintang tinggi (iklim subtropis) dan pengaruhnya terhadap polutan udara tidak signifikan. Inversi frontal terbentuk karena bertemunya massa udara bertekanan udara tinggi dengan massa udara bertekanan rendah.

Apakah inversi frontal dapat terjadi di daerah beriklim tropis seperti Indonesia? Jawaban hipotesisnya mungkin saja. Hal ini karena, meskipun dahulu Indonesia belum pernah mengalami kejadian puting beliung yang dapat disejajarkan dengan angin *tornado* di Amerika, kontribusi polutan udara (terutama yang bersifat antropogenik) terhadap kejadian cuaca ekstrem kini makin besar. Sifat polutan udara antropogenik adalah memanaskan permukaan yang menyebabkan perbedaan tekanan udara antara di permukaan dengan lapisan di atasnya. Selisih tekanan udara yang besar ini mengakibatkan terbentuknya angin berkecepatan tinggi. Kondisi cekungan topografi juga berkontribusi untuk menjadikan konsentrasi polutan udara terakumulasi dalam jumlah besar (secara kuantitas) dan berkonsentrasi tinggi (secara kualitas) ditambah pada musim kemarau kondisi kelembapan udara yang rendah (udara menjadi kering), sehingga angin yang terbentuk berkecepatan tinggi.

F. Dampak Kebisingan

Bising adalah energi bunyi atau suara yang mengakibatkan efek buruk pada psikologi dan psikis manusia dan mungkin juga hewan dan tumbuhan (Godish, 2003). Energi bunyi dihasilkan oleh benda yang bergetar atau digetarkan. Cara menggetarkan benda dapat

dengan dipukul, dipetik, diayunkan, dilemparkan, digas, diputar, dan ditembakkan.

Kekuatan bunyi dinyatakan dengan satuan desibel (dB). Kekuatan bising dipengaruhi oleh waktu. Pada waktu malam, suara yang berfrekuensi rendah mengakibatkan bising. Sementara itu, pada siang hari, frekuensi suara yang tinggi sering kali tidak mengakibatkan bising.

Dampak dari bising adalah stres, gangguan konsentrasi berpikir, sulit tidur, dan perubahan sensitivitas atau kepekaan seseorang terhadap frekuensi bunyi yang biasa terdengar, serta gangguan kesehatan mental dan ketulian. Sebuah studi menunjukkan bahwa orang yang tinggal dekat bandara menunjukkan tendensi tekanan darah yang lebih tinggi (Godish, 2003).

Tabel 9.3 menyajikan tingkat bising dan durasi (lamanya) suara yang diperbolehkan agar tidak menimbulkan dampak buruk. Sementara itu, Tabel 9.4 menyajikan tingkat bising yang dihasilkan pada jarak antara sumber bunyi dan objek pendengar.

Tabel 9.3 Kekuatan dan Lamanya Terpapar Suara yang Diperbolehkan

No.	Derajat Kebisingan (dBA)	Maksimum Paparan yang Diperbolehkan (jam)
1.	85	8
2.	90	4
3.	95	2
4.	100	1
5.	105	1/2
6.	110	1/4
7.	115	1/8

Sumber: Kusnoputranto dan Susanna (2000)

Berdasarkan Tabel 9.3 dapat diketahui bahwa makin besar kekuatan bunyi atau bising, durasi paparan makin singkat agar bising tidak menimbulkan dampak buruk. Sementara itu, menurut Tabel 9.4, dapat diketahui bahwa makin jauh jarak antara sumber bunyi dan objek pendengar, kekuatan bunyi akan makin kecil.

Tabel 9.4 Kekuatan Bunyi yang Dihasilkan pada Jarak Tertentu

No.	Jarak antara Sumber Bunyi dan Objek Pendengar	Kekuatan Bunyi (dBA)
1.	0,5 m	72
2.	1 m	66
3	2 m	60
4.	3 m	56
5.	4 m	54
6.	5 m	52

Sumber: Godish (2003)

Pada hewan seperti sapi perah, dampak bising mengakibatkan produksi susu menjadi berkurang dari sisi kuantitas dan kualitas. Sementara itu, pada peternakan ayam petelur, polusi udara mengakibatkan ayam tidak dapat bertelur akibat stres.

G. Dampak Polusi Udara Berupa Bau

Dampak polusi udara yang lain adalah bau. Bau dihasilkan oleh zat polutan udara, baik organik maupun anorganik yang bersifat *volatil* (mudah menguap) atau *semivolatile*. Tabel 9.5 menyajikan batas minimum konsentrasi zat polutan udara yang berlaku di Indonesia dan menghasilkan bau tidak sedap. Bau tidak enak akan tercium jika konsentrasi polutan udara lebih besar daripada nilai batas yang tercantum pada Tabel 9.5. Dampak dari bau akan berpengaruh pada psikologis manusia.

Tabel 9.5 Konsentrasi Minimal Ambien Zat Polutan Udara yang Menghasilkan Bau

No.	Polutan Udara	Nilai Batas (ppm)	Metode Pengukuran	Peralatan
1.	Amoniak (NH ₃)	2,0	Indofenol	Spektro-fotometer
2.	Metil Merkaptan (CH ₃ SH)	0,002	Absorbsi gas	Gas kromatograf

No.	Polutan Udara	Nilai Batas (ppm)	Metode Pengukuran	Peralatan
3.	Hidrogen sulfida (H ₂ S)	0,02	Merkuri tiosianat, absorpsi gas	Spektrofotometer
4.	Metil sulfida (CH ₃) ₂ S	0,01	Absorpsi gas	Gas kromatograf
5.	Stirena	0,1	Absorpsi gas	Gas kromatograf

Sumber: Yuwono (2008)

H. Dampak Polusi Cahaya

Polusi cahaya adalah penggunaan cahaya buatan berlebih atau tidak tepat penggunaannya yang dihasilkan oleh peradaban manusia modern, berdampak pada kehidupan, dan termasuk bentuk polusi (Priyantikanto et al., 2019). Hal ini karena polusi cahaya telah nyata menimbulkan dampak pada makhluk hidup dan lingkungannya dengan akibat yang tidak terduga (Rajkhowa, 2014).

Polusi cahaya tidak berarti cahaya yang mendapat efek pencemaran, tetapi cahaya itu sendiri yang menjadi sumber polutan bagi makhluk hidup dan lingkungannya (Nurfarida et al., 2017).

Tidak seperti pada polusi udara karena zat kimia yang ditemui hampir 24 jam, polusi cahaya hanya ditemui pada malam hari. Banyak pencahayaan di luar ruangan pada malam hari bersifat tidak efisien (terlalu terang dan boros energi) dan tidak efektif (tidak tepat sasaran dan tidak diperlukan), tetapi malahan menimbulkan polusi cahaya.

Polusi cahaya dikategorikan menjadi dua, yaitu cahaya yang mengganggu dan cahaya yang berlebihan (Raisal, 2020). Seperti pada polusi udara karena zat kimia, polusi cahaya berdasarkan lokasinya dibedakan menjadi polusi cahaya *indoor* dan *outdoor*. Bentuk polusi cahaya meliputi *glare* atau silau (cahaya latar belakang yang terlalu banyak); *sky glow* (langit terlalu terang yang berasal

dari lampu-lampu penerangan dari wilayah padat penduduk); *light treepass* (cahaya yang jatuh di tempat yang tidak diinginkan atau tidak dibutuhkan); *light clutter* (cahaya yang dapat menyebabkan gangguan penglihatan); *over illumination* (cahaya berlebih) (Prastyo & Herdiwijaya, 2018).

Glare ini berupa cahaya terang yang bersinar langsung dan mengenai mata sehingga menyilaukan dan dapat menyebabkan pusing (Walker et al., 2010). Sementara itu, *sky glow* sangat mengganggu para pengamat antariksa dan astronom saat melihat benda langit. Hal ini disebabkan *sky glow* membuat langit terang sehingga mengurangi kontras di langit dan tidak mungkin untuk melihat bintang paling terang (Rajkhowa, 2014). Terakhir, *light clutter* adalah pengelompokan lampu yang berlebih yang dapat menimbulkan kebingungan, membuat tidak fokus, dan mengurangi konsentrasi pengemudi kendaraan bermotor sehingga berpotensi menyebabkan kecelakaan.

Polusi cahaya berdampak pada visibilitas (jangkauan melihat), makhluk hidup (manusia, hewan, tumbuhan), dan lingkungannya. Dampak visibilitas dari polusi cahaya berbeda dengan dampak visibilitas pada polusi udara karena zat kimia. Penurunan visibilitas karena dampak polusi cahaya adalah berupa penurunan daya melihat bintang, bulan, dan benda langit lain pada malam hari, terutama untuk penelitian antariksa dan astronomi; penentuan awal bulan Ramadhan; awal bulan Syawal; wukuf di Arafah pada 9 Zulhijah; dan Idul Adha pada 10 Zulhijah. Polusi cahaya menyebabkan pengamat tidak dapat melihat kondisi bintang sebenarnya atau posisi hilal dari bulan yang akan memengaruhi hasil observasi antariksa atau kesalahan fatal dalam penentuan awal bulan Ramadhan dan Syawal.

Dampak polusi cahaya bagi manusia, selain penurunan visibilitas, juga berupa dampak langsung yang memengaruhi kesehatan serta dampak tidak langsung berupa keberlanjutan kehidupan manusia yang sangat tergantung pada hewan dan tumbuhan sebagai pangannya. Pencahaya berlebih atau komposisi spektrum cahaya yang tidak tepat akan berdampak pada kesehatan berupa gejala sakit kepala, mual, kelelahan bekerja, stres, penurunan

fungsi seksual, peningkatan kecemasan, dan kesehatan retina (Rajkhowa, 2014).

Penemuan teknologi lampu *light emitting diode* (LED) dengan memancarkan cahaya putih terang ternyata dapat memengaruhi fisiologi retina yang mendorong kematian sel dan dapat mengakibatkan kebutaan serta desinkronisasi (Contin, 2016). Pauley (2004) menambahkan bahwa bahwa kanker payudara dan kanker kolorektal adalah dua jenis kanker yang dapat ditimbulkan oleh polusi cahaya.

Dampak polusi cahaya pada hewan dapat mengacaukan navigasi (pola jelajah) hewan terutama hewan *nocturnal* (hewan yang aktivitas dominannya dilakukan pada malam hari), mengganggu hubungan interaksi antar *predator* (pemangsa) dan *prey* (mangsa), dan memengaruhi fisiologi hewan.

Polusi cahaya menyebabkan spesies burung yang terdapat di Amerika Utara dibuat kebingungan oleh bangunan yang terang benderang dan menara komunikasi ketika bermigrasi pada malam hari. Navigasi burung yang menggunakan cakrawala sebagai orientasi tujuan migrasinya terganggu oleh pencahayaan berlebih di langit. Berbeda dengan yang terjadi di New York, sekitar 10.000 ekor burung yang melakukan migrasi terluka atau terbunuh karena menabrak gedung pencakar langit dan gedung bertingkat tinggi (Chepesiuk, 2014). Menurut Raisal (2020), beberapa bukti menunjukkan bahwa pencahayaan malam buatan memengaruhi pilihan lokasi sarang pada burung.

Disorientasi juga dialami kura-kura yang selalu menghindari kondisi tempat yang terang benderang (mengalami polusi cahaya) untuk sarang bertelur. Akibatnya, kura-kura susah mencari tempat untuk bertelur dan tersasar ke jalan raya terdekat yang berisiko tertabrak kendaraan (Chepesiuk, 2014). Pengembangan pantai-pantai sebagai objek wisata bahari mengakibatkan di sekitar pantai didirikan penginapan yang dilengkapi gemerlap lampu terang benderang dan sebagai sumber polusi cahaya yang mengganggu

aktivitas kura-kura dan keberlangsungan hidup kura-kura (karena tidak dapat bertelur pada tempat yang berlebih cahaya).

Pengembangan hutan bakau (kawasan mangrove) selain sebagai objek wisata bahari juga untuk tujuan konservasi yang dilengkapi rumah makan dan penginapan bertaburan lampu terang (cahaya putih) turut mengganggu aktivitas ikan. Hutan mangrove adalah habitat ikan dan merupakan tempat *nursery* (bertelur, menetas, dan perawatan ikan-ikan kecil). Ikan menghindari sumber cahaya putih. Cahaya putih mengganggu perilaku alami ikan. Jika ikan terpapar oleh cahaya lampu putih berlebih dalam waktu lama, maka akan berakibat pada kerusakan mata ikan (Rajkhowa, 2014). Terganggunya keberadaan ikan di laut karena polusi cahaya akan berakibat pada penangkapan ikan oleh nelayan menjadi turun dan menyebabkan harga ikan melonjak dan pendapatan nelayan menurun. Pengamatan menunjukkan bahwa jumlah rata-rata penangkapan dan penangkapan ikan lebih besar di bawah cahaya merah daripada cahaya putih. Hal ini pula yang menjadi alasan nelayan menangkap ikan di laut pada malam hari. Selain terbantu oleh angin darat yang membawa nelayan berlayar ke tengah laut mencari ikan, ikan juga cenderung menampakkan diri pada malam hari.

Polusi cahaya juga berdampak pada kemampuan navigasi hewan serangga *nocturnal* seperti kumbang, ngengat, jangkrik, dan laba-laba. Serangga jenis ngengat membantu penyerbukan bunga yang dilakukan pada malam hari. Polusi cahaya membuat ngengat tidak mengetahui jalan untuk melakukan penyerbukan (disorientasi) sehingga bunga tidak diserbuk dan bunga tidak dapat melakukan regenerasi (reproduksi dan berkembang biak). Dalam waktu yang lama, tanaman dengan bunga yang tidak mengalami penyerbukan lama-kelamaan akan punah (Rajkhowa, 2014).

Polusi cahaya selain berdampak pada gangguan navigasi juga terganggunya siklus ritme irama alam yang disebut keberkalaan (Supriatin, 2014). Keberkalaan berdasarkan periode waktu dikelompokkan menjadi ritme irama tahunan (fenologi), ritme irama

bulanan kamariah (revolusi bulan mengelilingi bumi) berperiode 28 hari, ritme irama pasang-surut berperiode 12,8 jam, dan ritme irama piantan berperiode 24 jam yang disebut sirkadian (Ewusie, 1990). Hewan memiliki kemampuan untuk menentukan waktu. Polusi cahaya mengakibatkan hewan menduga malam hari menjadi siang hari sehingga dapat mengganggu metabolisme dan fisiologi hewan. Polusi cahaya juga dapat menyebabkan terganggunya kesehatan burung dengan cara mengganggu ritme sirkadian dari burung. Gangguan ritme sirkadian tersebut akan menghambat pelepasan melatonin dan mengubah mikrobiota usus pada burung (Jiang et al., 2020).

Dampak polusi cahaya lain adalah pada hewan kunang-kunang. Kunang-kunang termasuk hewan *nocturnal* yang tubuhnya memiliki dan memancarkan cahaya sendiri di tempat gelap. Banyak lokasi yang mengalami polusi cahaya menyebabkan terganggunya metabolisme kunang-kunang terkait produksi cahaya. Metabolisme dan fisiologi kunang-kunang yang terganggu dalam waktu yang lama mengakibatkan kematian kunang-kunang atau bermigrasi ke tempat yang belum terjadi polusi cahaya. Ketika masa reproduksi (masa kawin), kunang-kunang jantan akan memancarkan cahaya yang lebih kuat untuk menarik lawan jenis (kunang-kunang betina). Polusi cahaya mengakibatkan cahaya yang dipancarkan kunang-kunang menjadi kalah sehingga masa kawin kunang-kunang terhambat. Jika polusi cahaya terjadi terus-menerus, populasi kunang-kunang bahkan berpotensi punah.

Kepunahan salah satu jenis hewan akan berdampak pada hubungan mangsa (*prey*) dan pemangsa (*predator*). Jika suatu hewan menjadi pemangsa, kepunahan hewan tersebut akan mengakibatkan populasi mangsa (*prey*) makin melimpah. Sebaliknya, jika hewan tersebut adalah *prey*, kepunahan hewan tersebut akan mengakibatkan hewan pemangsa juga populasinya makin sedikit. Kasus melimpahnya populasi belalang atau ulat yang menyerbu suatu lokasi dapat saja disebabkan dan dianalisis dari sisi polusi cahaya. Kematian atau punahnya salah satu *prey* atau *predator* akan

mengakibatkan jaring makanan, rantai makanan, dan keseimbangan alam terganggu.

Polusi cahaya juga berdampak pada tumbuhan. Berdasarkan panjang hari dan lama penyinaran matahari, tumbuhan dikelompokkan menjadi tumbuhan berhari panjang (memerlukan lama penyinaran lebih dari 12 jam atau membutuhkan waktu malam lebih pendek dan waktu siang lebih panjang), tumbuhan berhari pendek (memerlukan lama penyinaran kurang dari 12 jam atau membutuhkan waktu malam yang lebih panjang), dan tumbuhan netral (memerlukan lama penyinaran 12 jam). Polusi cahaya secara tidak langsung berdampak pada metabolisme dan fisiologi tumbuhan berhari pendek. Polusi cahaya akan berdampak positif pada tumbuhan berhari panjang terutama di daerah iklim tropis.

I. Penutup

Polusi udara adalah pencemaran yang terjadi di udara. Polusi udara didefinisikan sebagai masuknya atau dimasukkannya zat dan energi, baik secara alami maupun buatan sehingga terjadi penurunan fungsi lingkungan atau berdampak penting pada makhluk hidup dan lingkungannya. Berdasarkan definisi tersebut, polusi udara pada tulisan ini meliputi polusi udara karena zat kimia, energi suara atau bunyi yang berlebih, dan energi cahaya yang berlebih.

Baik polusi udara alami maupun buatan yang memiliki konsentrasi kimia polutan udara tinggi atau suara yang sangat keras atau cahaya yang berlebih akan berdampak pada makhluk hidup dan lingkungan, yang tidak saja lingkungan udara (atmosfer), tetapi juga polusi udara zat kimia akan berdampak pada lingkungan perairan (badan air dan laut) serta lingkungan darat (tanah). Dampak polutan udara bersifat langsung mengenai objek yang selalu terpapar atau tidak langsung yang memerlukan waktu lama dari terpapar sampai menimbulkan dampak buruk yang berpengaruh pada kesehatan..

Sebagian besar dampak polutan udara adalah pada kesehatan (karena polusi udara zat kimia, polusi cahaya, dan bising), visibilitas (polusi udara zat kimia dan polusi cahaya), dan keanekaragaman

hayati (polusi udara zat kimia dan polusi cahaya). Selain itu, polusi udara zat kimia dapat berkontribusi pada perubahan cuaca dan iklim. Oleh karena itu, sudah saatnya dilakukan mitigasi untuk mengurangi sumber polusi udara.

Keikutsertaan pihak swasta dalam pembuatan beberapa taman kota pada area jalan yang macet dapat bermanfaat untuk menyerap polutan yang diemisikan oleh kendaraan bermotor yang merupakan produk pabrikan dari pihak swasta tersebut. Pemerintah dengan kebijakan bahan bakar gas untuk rumah tangga, transportasi beroperasi *on line* (sesuai pesanan dan aplikasi), mengadakan transportasi publik (*Mass Rapid Transit*), program kendaraan bermotor berbahan bakar listrik, kebijakan ganjil-genap adalah beberapa langkah nyata dari pemerintah untuk mengurangi emisi polutan udara.

Transportasi *on line* adalah salah satu cara untuk tidak terjadinya penumpukan kendaraan umum yang beroperasi yang dapat berakibat macet, pemborosan bahan bakar minyak, dan polusi udara. Pemberlakuan konsep eksternalitas bagi pelaku industri, pemakai kendaraan bermotor, dan pemilik penginapan dapat dicobakan. Para pelaku ini harus membayar biaya dampak lingkungan yang terdegradasi kepada objek terkena dampak. Penegakan hukum harus dijalankan tanpa pandang bulu sehingga pelaku pencemar jera dan tidak mengulangi.

Daftar Pustaka

- Abbasi, S., Sellgren, U., & Olofsson, U. (2013). Technical note: Experiences of studying airborne wear particles from road and rail transport. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(4), 1161–1169. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0295>
- Agustiarni, Y. (2008). *Pengaruh hutan kota dalam mengurangi hujan asam di kawasan industri: Studi kasus di Kawasan Industri Medan, Kelurahan Malabar, Kecamatan Medan Deli, Medan* [Skripsi, Universitas Sumatra Utara].

- Alfiandy, S., Permana, D. S., Nugraha, M. S., & Putri, I. J. A. (2021). Analisis kimia dan kualitas air hujan di Kota Palu sebagai penyebab terjadinya hujan asam. *Jurnal Riset Kimia*, 10-18. <https://doi.org/10.25077/jrk.v12i1.36>
- Anandari, A. A., Wadjdi, A. F., & Harsono, G. (2024). Dampak polusi udara terhadap kesehatan dan kesiapan pertahanan negara di Provinsi DKI Jakarta. *Journal on Education*, 6(2), 10868–10884.
- A'yuna, I. Q., & Umaroh, R. (2022). Polusi udara dalam ruangan dan kondisi kesehatan: Analisis rumah tangga Indonesia. *Jurnal Ekonomi dan Pembangunan Indonesia*, 22(1), 16–26.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. (2006). *Strategi dan rencana aksi nasional untuk peningkatan kualitas udara perkotaan*.
- Barker, J. R., & Tingey, D. T. (1992). The effect of air pollution on biodiversity: A synopsis. Dalam J. R. Barker & D. T. Tingey (Eds.), *Air pollution effects on biodiversity* (hlm. 3–8). Van Nostrand Reinhold.
- Brauers, H., & Oei, P. Y. (2020). The political economy of coal in Poland: Drivers and barriers for a shift away from fossil fuels. *Energy Policy*, 144, Article 111621. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111621>
- Chepesiuk, R. (2009). Missing the dark: Health effects of light pollution. *Environmental Health Perspectives*, 117(1), A20–A27.
- Contín, M. A., Benedetto, M. M., Quinteros-Quintana, M. L., & Guido, M. E. (2016). Light pollution: The possible consequences of excessive illumination on retina. *Eye*, 30, 255–263. <https://doi.org/10.1038/eye.2015.221>
- Cooper, C. D., & Alley, F. C. (1986). *Air pollution control: A design approach*. Waveland Press.
- Cowling, E. B., & Davey, C. B. (1981). Acid precipitation: Basic principles and ecological consequence. *Pulp and Paper*, 55(8), 182–185.
- Ewusie, J. Y. (1990). *Pengantar ekologi tropika*. ITB Press.
- Fath, M. A. (2021). Literature review: Pengaruh kualitas udara dan kondisi iklim terhadap perekonomian masyarakat. *Media Gizi Kesmas*, 10(2), 329–342.
- Glass, N. R., Glass, G. E., & Rennie, P. J. (1979). Effect of acid precipitation. *Environmental Science and Technology*, 13(11), 1350–1352.
- Godish, T. (2003). *Air quality* (4th ed.). Lewis Publishers.

- Graves, J., & Reavey, D. (1996). *Global environmental change: Plants, animals, and communities*. Longman.
- Hendrey, G. R., K. Baalsrud, T. S. Traaen, M. Laake, & G. Raddum. (1976). Acid precipitation: Some hydrobiological changes. *Ambio*, 5(5), 224–227.
- Hourani, L. L., Williams, T. V., & Kress, A. M. (2006). Stress, mental health, and job performance among active duty military personnel: Findings from the 2002 Department of Defense Health Related Behaviors Survey. *Military Medicine*, 171(9), 849–856. <https://doi.org/10.7205/MILMED.171.9.849>
- Iffani, W., Astuti, E. S., & Anjaswarni, T. (2019). Global warming dan climate change hubungannya dengan vektor borne diseases. Dalam *Ekologi, pemanasan global dan kesehatan*. Aseni.
- Ivanova, V. R. (2020). The anthropogenic air pollution and human health. *Journal of IMAB Annual Proceeding Scientific Papers*, 26(2), 3057–3062. <https://doi.org/10.5272/jimab.2020262.3057>
- Jiang, J., Y. He, H. Kou, Z. Ju, X. Gao, & H. Zhao. (2020). The effects of artificial light at night on Eurasian tree sparrow (*Passer montanus*): Behavioral rhythm disruption, melatonin suppression and intestinal microbiota alterations. *Ecological Indicators*, 108, Article 105702. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105702>
- Kusnoputranto, H., & Susanna, D. (2000). *Kesehatan lingkungan*. Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia.
- Liu, D. H. F., & Liptak, B. G. (1999). *Air pollution*. Lewis Publishers.
- Madigan, M. T., Martinko, J., Dunlap, P. V., & Clark, D. P. (2009). *Brock biology of microorganisms* (12th ed.). Pearson/Benjamin Cummings. San Francisco. 1061 pages.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, Article 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Mehta, P. (2010). Science behind acid rain: Analysis of its impact and advantages on life and heritage structure. *South Asian Journal of Tourism and Heritage*, 3(2), 123–132.
- Nurfarida, L., Yusup, P. M., & Komariah, N. (2017). Tingkat pengetahuan masyarakat sekitar Observatorium Bosscha Lembang mengenai polusi cahaya. *Jurnal Kajian Informasi & Perpustakaan*, 5(1), 13–22. <https://doi.org/10.24198/jkip.v5i1.11327>

- Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63(4), 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.03.020>
- Pratama, R., & Parinduri, L. (2019). Penanggulangan pemanasan global. *Buletin Utama Teknologi*, 15(1), 91–95.
- Prastyo, H. A., & Herdiwijaya, D. (2018). Analisis dinamika polusi cahaya di sekitar Observatorium Bosscha berdasarkan citra satelit VIIRS-DNB. *Proseding Seminar Nasional Penginderaan Jauh ke-5 Tahun 2018*. Pusat Teknologi dan Data Penginderaan Jauh (Pustekdata), LAPAN. 1–9.
- Priyatikanto, R., A. G. Admiranto, G. P. Putri, Elyyani, S. Maryam, & N. Suryana. (2019). Map of sky brightness over Greater Bandung and the prospect of astro tourism. *Indonesian Journal of Geography*, 51(2), 190–198. DOI: <http://dx.doi.org/10.22146/ijg.43410>
- Puspitasari, R. D., & Fauziah, S. (2023). *Faktor risiko pencemaran udara terhadap kesehatan di Indonesia*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/375112234>
- Raisal, A. Y., Pramudya, Y., Okimustava, & Muchlas. (2017). The moon phases influence on the beginning of astronomical dawn determination in Yogyakarta. *International Journal of Science and Applied Science: Conference Series*, 2(1), 1–7.
- Raisal, A. Y. (2020). Polusi cahaya dan pengaruhnya terhadap kehidupan. *Prosiding Observatorium dan Astronomi Islam*. 1(1). 1–12
- Rajkhowa, R. (2014). Light pollution and impact of light pollution. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(10), 861–867.
- Richard, E. S., Williams, S. N., & Huebert, B. (1987). Annual contribution of SO₂ to the atmosphere by volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 1–8.
- Sawyer, G. M., Salerno, G. G., Le Blond, J. S., Martin, R. S., Spampinato, L., Roberts, T. J., Macher, T. A., Witt, M. L. I., Tsanev, V. I., & Oppenheimer, C. (2008). Gas and aerosol emissions from Villarrica Volcano, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203, 62–75.
- Soedomo, M. (2001). *Pencemaran udara*. ITB Press.
- Sumaryati. (2014). Mixing height di atas gunung api di Sumatra terkait dengan penyebaran SO₂ vertikal. *Jurnal Lingkungan Tropis*, 8(1), 39–47.

- Supriatin, L. S. (2014a). Potensi emisi metana akibat banjir. *Berita Dirgantara*, 15(1), 27–32.
- Supriatin, L. S. (2014). *Sistem pertanian padi sawah berkelanjutan pada iklim tropika basah* [Disertasi, Universitas Indonesia].
- Supriatin, L. S. (2017). Konsep daerah aliran udara erupsi gunung api dan aplikasinya. *Berita Dirgantara*, 18(1). (1), 37–42.
- Torjesen, I. (2015). Even low levels of air pollution are linked to more deaths in over 65s, study finds. *BMJ*, 350, Article h3043. <https://doi.org/10.1136/bmj.h3043>
- Undang-Undang Nomor 4 Tahun 1982 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Pengelolaan Lingkungan Hidup.
- United States Geological Survey. (2010). *Volcanic gases*. <https://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php>
- Walker, C. E., Pompea, S. M., Sparks, R. T., & Dokter, E. (2010). Teaching illumination engineering using light pollution education kits. *Proceedings of SPIE: Optics Education and Outreach*, 7783, 1–11. <https://doi.org/10.1117/12.862713>
- Wardhana, W. (1995). *Dampak pencemaran lingkungan*. Andi Offset.
- Wetstone, G. S., & Foster, S. A. (1983). Acid precipitation: What is it doing to our forests? *Environment*, 25(4), 10–12, 38–40.
- Wihardjo, R. S. D., & Rahmayanti, H. (2021). *Pendidikan lingkungan hidup*. Penerbit NEM.
- Wright, R. F., & Gjessing, E. T. (1976). Acid precipitation: Changes in the chemical composition of lakes. *Ambio*, 5(5), 219–224.
- Yuwono, A. S. (2008). *Kuantifikasi bau dan polusi bau di Indonesia*. Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, IPB.
- Zhang, Y., Yang, P., Gao, Y., Leung, R. B., & Bell, M. L. (2020). Health and economic impacts of air pollution induced by weather extremes over the continental U.S. *Environment International*, 143, Article 105921. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105921>