

Bab VI

Deposisi Asam

Dyah Aries Tanti, Asri Indrawati, dan Nindia Noviastruti

Manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya memanfaatkan dan mengeksploitasi sumber daya alam serta menggunakan berbagai sumber energi untuk menghasilkan fasilitas yang memudahkan kehidupan sehari-hari. Meskipun hal ini membawa kemudahan, penggunaan sumber daya dan energi ini juga menghasilkan emisi zat berbahaya yang menyebabkan polusi lingkungan.

Sejak era industrialisasi di berbagai negara, polusi udara telah menjadi masalah serius. Di perkotaan, transportasi adalah sumber utama emisi gas pencemar seperti SO_2 , NO_x , CO , CO_2 , CH_4 , O_3 , dan partikulat (Ferlita et al., 2023). Selain itu, sumber polusi udara alami seperti gunung berapi aktif juga berkontribusi pada pencemaran, mengeluarkan gas berbahaya seperti H_2S , SO_2 , serta HCl dan HF yang berdampak pada lingkungan sekitarnya.

D. A. Tanti, A. Indrawati, & N. Noviastruti

Badan Riset dan Inovasi Nasional, e-mail: dyah.ariestanti@brin.go.id

© 2026 Editor & Penulis

Tanti, D. A., Indrawati, A. & Noviastruti, N. (2026). Deposisi Asam. Dalam Sumaryati & L. S. Supriatin (Ed.), *Fenomena Polusi Udara dan Dampaknya* (101–119). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1375.c1810
E-ISBN: 978-634-7933-34-8

Polusi udara menimbulkan berbagai masalah lingkungan, termasuk deposisi asam yang merupakan isu serius secara global. Deposisi asam merupakan peristiwa pengendapan zat asam yang ada di atmosfer ke bumi, baik secara basah dalam bentuk salju, hujan, kabut, dan embun maupun pengendapan secara kering dalam bentuk gas, partikel, uap, dan aerosol (Mohajan, 2019).

Sumber utama deposisi asam adalah sulfur oksida dan nitrogen oksida, yang berasal dari sumber alami ataupun antropogenik (Prakash et al., 2023). Emisi gas-gas tersebut meningkat di atmosfer disebabkan oleh meningkatnya aktivitas manusia seperti pembakaran biomassa, pembakaran bahan bakar fosil untuk kendaraan bermotor serta pembangkit listrik, dan kegiatan industri.

Deposisi asam kini menjadi masalah global yang mengkhawatirkan karena dampaknya terhadap ekologi, seperti kematian ikan di danau dan rawa, kerusakan hutan, serta kerusakan pada monumen dan artefak bersejarah. Selain itu, deposisi asam juga menimbulkan berbagai masalah kesehatan, termasuk iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta gangguan paru-paru seperti batuk kering, asma, dan bronkitis, di samping keluhan lain seperti sakit kepala (Mohajan, 2019).

Pada pertengahan abad ke-19, fenomena deposisi asam pertama kali diobservasi di Eropa oleh seorang ilmuwan bernama Ducros pada tahun 1845, dan kemudian dikembangkan oleh peneliti asal Inggris, Robert Angus Smith, pada tahun 1852. Dalam penelitiannya, Smith mengaitkan emisi yang dihasilkan oleh industri sebagai sumber utama deposisi asam yang memengaruhi kualitas lingkungan (Fatima, 2021).

Pemantauan dan penelitian deposisi asam terus berlanjut hingga saat ini. Beberapa organisasi di dunia yang dinaungi oleh World Meteorological Organization (WMO) melakukan pemantauan deposisi asam, seperti *Canadian Air Pollution Monitoring Network* (CAPMoN), *National Atmospheric Deposition Program* (NADP), *Acid Deposition Monitoring Network in East Asia* (EANET), *International*

Network to study Deposition and Atmospheric Chemistry in Africa (IDAAF) (NEASPEC & ACAP, 2022). (Yamashita, 2022).

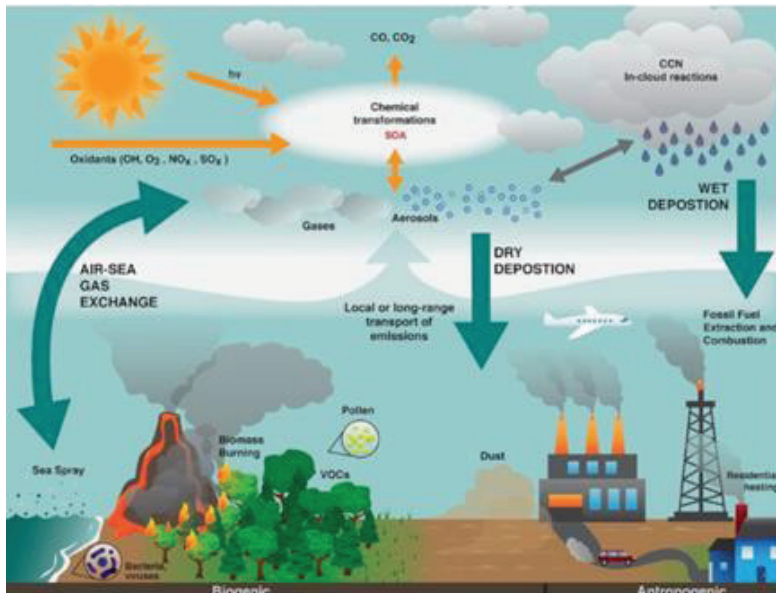
Sebagai negara berkembang, Indonesia tidak luput dari masalah deposisi asam. Monitoring deposisi asam dilakukan di Indonesia sejak tahun 1998 dengan keikutsertaannya dalam jaringan pemantauan deposisi asam di kawasan Asia Timur, yaitu EANET. Jaringan pemantauan deposisi asam di Indonesia berada di bawah koordinasi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagai National Focal Point (NFP). Pemantauan deposisi asam di Indonesia, baik berupa deposisi basah maupun deposisi kering, dilakukan oleh PSIKLH, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

A. Deposisi Asam

Deposisi asam dapat terjadi secara basah dan kering. Pada deposisi basah, gas dan partikel asam jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, kabut, atau salju. Sementara itu, deposisi kering terjadi ketika gas, partikel, uap, dan aerosol menempel langsung pada permukaan bumi tanpa melibatkan presipitasi (Wondyfraw, 2014).

1. Deposisi Basah

Deposisi basah terjadi saat bahan kimia bersifat asam yang ada di udara turun ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, salju, kabut, atau embun. Deposisi basah terjadi melalui dua proses, yaitu *rainout* dan *washout*. *Rainout* terjadi ketika aerosol dan gas polutan di atmosfer membentuk awan dan turun menjadi tetesan air hujan, sedangkan *washout* terjadi ketika aerosol dan gas yang ada di atmosfer tersapu oleh air hujan dan turun ke permukaan bumi (Carnelos et al., 2024). Zat asam akan masuk ke dalam tanah dan memengaruhi berbagai tanaman dan hewan serta aliran air tanah.



Gambar 6.1 Mekanisme Deposisi Basah dan Deposisi Kering

2. Deposisi Kering

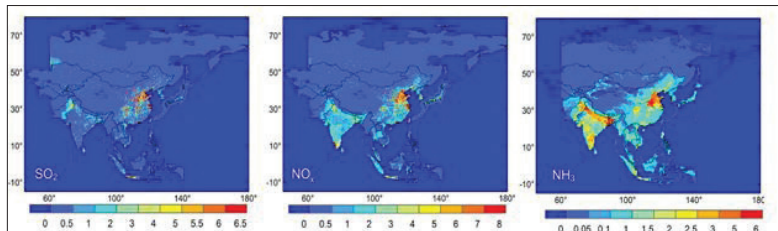
Deposisi kering berkaitan dengan gas dan partikel asam di atmosfer. Di daerah yang cuacanya kering, bahan asam turun ke bumi melalui deposisi kering. Partikel dan gas asam jatuh ke permukaan bumi akibat gaya gravitasi, atau bergabung dengan debu dan asap yang kemudian terbawa angin dan menempel pada tanah, tanaman, bangunan, mobil, dan benda lainnya. Keasaman di atmosfer sebagian besar turun kembali ke permukaan bumi melalui deposisi kering, yaitu hingga 20–60% dari total keasaman (How Does Dry, 2025). Saat hujan turun, partikel akan tercuci dan menghasilkan campuran yang lebih asam dan sangat korosif korosif (Carnelos et al., 2024).

B. Sumber Deposisi Asam

Penyebab terjadinya deposisi asam adalah dari sumber alami dan antropogenik. Kegiatan antropogenik menjadi penyumbang utama

deposisi asam di daerah perkotaan melalui bahan asan anorganik, seperti pembakaran bahan bakar fosil dari kegiatan transportasi dan industri. Sementara itu, di daerah pedesaan, sumber keasaman di atmosfer lebih banyak dihasilkan dari sumber alami seperti emisi bahan organik yang mudah menguap dari vegetasi, kotoran ternak, dan emisi dari laut (Payus et al., 2020).

Di atmosfer, gas-gas polutan akan bereaksi dengan uap air, oksigen, dan gas-gas lainnya membentuk asam sulfat, asam nitrat, dan amonium nitrat. Zat-zat asam tersebut akan turun ke permukaan bumi bersama air hujan sebagai hujan asam atau terbawa angin dan turun langsung mengenai tanah, tanaman, ataupun benda-benda lainnya.



Sumber: Duan et al. (2016)

Gambar 6.2 Emisi dari Prekursor Pengasaman Atmosfer di Asia pada Tahun 2010 Inventarisasi Emisi MIX Asia (unit: Gg/grid). Resolusi peta 0,25 x 0,25

Gambar 6.2 menyajikan distribusi spasial emisi SO₂, NO_x dan NH₃ di Asia pada tahun 2010 hasil dari inventarisasi MIX Asia (Duan et al., 2016), didapatkan bahwa emisi SO₂ dan NO_x umumnya dihasilkan selama konsumsi bahan bakar dan terkonsentrasi di wilayah-wilayah berpenduduk dengan konsumsi energi tinggi, seperti Cina Timur dan India. Sementara itu, emisi NH₃ cenderung tersebar di wilayah dengan aktivitas pertanian intensif, seperti Cina, India, dan Asia Tenggara.

Sumber polutan yang menyebabkan terjadinya hujan asam di Indonesia sebagian besar berasal dari kegiatan antropogenik, seperti transportasi dan kegiatan industri, terutama untuk daerah

perkotaan dengan kepadatan lalu lintas dan daerah pusat-pusat industri. Sementara itu, emisi NH_x berasal dari kegiatan pertanian di daerah pedesaan, serta dari proses pembakaran pada kendaraan bermotor di daerah urban (Budiwati *et al.*, 2016; Indrawati *et al.*, 2019; Puji Lestari *et al.*, 2008).

C. Reaksi Kimia Deposisi Asam

Keasaman dinyatakan dengan nilai pH dengan skala nilai pH (0–14). Air destilasi memiliki pH netral 7, sedangkan larutan dengan pH kurang dari 7 bersifat asam dan pH lebih dari 7 bersifat basa.

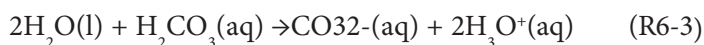
Skala pH bersifat logaritmik, penurunan nilai pH sebesar satu satuan menunjukkan peningkatan konsentrasi ion hidrogen sebanyak 10 kali, sedangkan penurunan sebesar dua satuan menunjukkan peningkatan konsentrasi ion hidrogen sebanyak 100 kali (Mohajan, 2018). Nilai pH pada larutan dihitung dengan rumus:

$$\text{pH} = -\text{Log} (\text{H}^+) \quad (\text{R6-1})$$

Air hujan secara alami bersifat asam dengan nilai pH sekitar 5,2 karena adanya reaksi antara karbon dioksida dan air membentuk asam karbonat.



Asam karbonat merupakan asam lemah dan menyebabkan penurunan pH air hujan dengan tingkat yang bervariasi antara 6–5,2. Asam karbonat akan terionisasi dalam air membentuk ion hidronium dan karbonat:

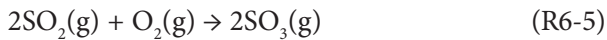


Deposisi asam disebabkan oleh emisi dari SO_2 dan NO_x (NO dan NO_2). Reaksi kimia pembentukan hujan asam melibatkan interaksi antara SO_2 , NO_x dan O_3 . Di atmosfer, SO_2 dan NO_x dengan bantuan sinar matahari akan bereaksi dengan molekul air membentuk asam

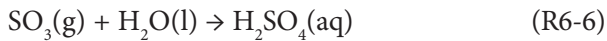
sulfat dan asam nitrat. Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar menghasilkan sulfur (S) yang akan membentuk SO_2 .



SO_2 di atmosfer bereaksi dengan oksigen membentuk SO_3 :



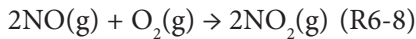
SO_3 bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk H_2SO_4 :



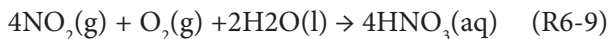
Oksidasi N_2 dari emisi kendaraan:



Nitrogen oksida (NO) bereaksi dengan oksigen (O_2) membentuk nitrogen dioksida (NO_2).



Konversi fotokimia menjadi HNO_3 :



D. Pemantauan Deposisi Asam

Pemantauan deposisi asam merupakan salah satu upaya yang dilakukan untuk mengukur dan memahami dampak yang ditimbulkan deposisi asam terhadap lingkungan. Kegiatan pemantauan deposisi asam terdiri atas pengumpulan dan analisis data terhadap deposisi basah dan deposisi kering. Hasil dari kegiatan pemantauan dapat memberikan masukan kepada pembuatan kebijakan yang terkait masalah lingkungan dalam menilai dan merumuskan strategi untuk mengurangi dampak negatif dari deposisi asam terhadap lingkungan. Beberapa aspek yang harus diperhatikan dalam kegiatan pemantauan deposisi asam adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan Sampel

Pengumpulan sampel merupakan tahap penting dalam melakukan pemantauan deposisi basah. Menurut manual pemantauan deposisi asam EANET (2010) yang harus diperhatikan dalam pengumpulan sampel meliputi hal-hal berikut.

a. Lokasi Sampling

Penempatan lokasi sampling memainkan peran penting dalam kualitas dan jenis data yang dihasilkan. Lokasi sampling harus merepresentasikan maksud dari kegiatan pemantauan deposisi asam. Kolokasi antara pemantauan deposisi basah dan deposisi kering yang dilengkapi dengan pemantauan data meteorologi sebaiknya dilakukan untuk memberikan data yang komprehensif.

b. Durasi Sampling

Durasi sampling untuk deposisi basah dan deposisi kering berbeda. Durasi sampling untuk deposisi basah dilakukan setiap hari hujan atau komposit selama 7 hari. Sementara itu, untuk sampling deposisi kering disesuaikan dengan metode sampling deposisi kering yang dilakukan.

c. Peralatan Sampling

Pada pemantauan deposisi basah, peralatan utama sampling yang dibutuhkan yaitu *rainwater/snow sampler*. Peralatan sampling deposisi basah biasanya dilengkapi dengan sensor untuk menggerakkan penutup sampler pada saat hujan atau turunnya salju. Sementara itu, untuk sampling deposisi kering, pemantauan dapat menggunakan beberapa peralatan, baik dengan metode aktif (misalnya *filterpack*) maupun pasif (misalnya *passive sampler*).



Sumber: EANET (2010)

Gambar 6.3 Automatic Rain Sampler untuk Sampling Deposisi Basah



(a)

(b)

Keterangan: (a) Filter Pack; (b) Passive Sampler

Sumber: LAPAN (2016)

Gambar 6.4 Alat Sampling Deposisi Kering Analisis Laboratorium

Analisis kimia yang dilakukan pada sampel deposisi asam, baik deposisi basah maupun deposisi kering merupakan langkah penting dalam penentuan komposisi dan konsentrasi kimia dari total deposisi asam di atmosfer. Parameter kimia untuk deposisi asam dan metode analisisnya terdapat pada Tabel 6.1 di bawah ini (EANET, 2010).

Tabel 6.1 Parameter dan Teknik Analisis Deposisi Asam

Analit	Teknik Analisis
Deposisi Basah:	
Konduktivitas	Sel konduktivitas
pH	Elektrode
Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
NH_4^+	Kromatografi ion, spektrofotometri (<i>indophenol blue</i>)
Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Kromatografi ion, <i>atomic absorption/emission spectrometry</i>
HCO_3^-	Kromatografi ion, alkalinitas, HPLC
NO_2^- , F^- , PO_4^{3-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
Asam organik	Kromatografi ion
Logam berat, Al	<i>Atomic absorption spectrometry</i> (AAS) dengan <i>graphite furnace</i> , ICP, ICP/MS
Merkuri	AAS dengan <i>graphite furnace</i> , ICP, ICP/MS, <i>mercury analyzer</i>
Deposisi Kering:	
Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}	Kromatografi ion, spektrofotometri
NH_4^+	Kromatografi ion, spektrofotometri (<i>indophenol blue</i>)
NH_3	Kromatografi ion
SO_2 , O_3	Kromatografi ion
NO_2	Spektrofotometri
HNO_3 , HCl	Kromatografi ion
VOC	Kromatografi gas (GC)/MS

E. Dampak Deposisi Asam

Deposisi asam memberikan dampak pada lingkungan, ekosistem, dan juga kesehatan manusia. Baik deposisi basah maupun kering akan turun ke permukaan bumi dan menempel pada ekosistem hutan, tanah, kemudian mengalir ke danau dan sungai.

Emisi sulfur dioksida dan nitrogen oksida dari hujan asam menyebabkan iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, serta gangguan paru-paru, seperti batuk kering, asma, sakit kepala, dan bronkitis. Hujan asam menyebabkan permasalahan ekonomi, sosial, dan

kesehatan secara luas, serta menjadi permasalahan secara global (Bhargava, 2013).

1 Efek pada Ikan dan Perairan

Deposisi asam menyebabkan peningkatan keasaman pada perairan seperti kolam, sungai, danau, teluk, dan perairan lainnya. Deposisi asam berdampak secara langsung dan tidak langsung terhadap kehidupan perairan.

Dampak secara langsung pada ikan di perairan antara lain dapat menyebabkan perubahan kimiawi darah dan terhambatnya perkembangan telur. Dampak tidak langsung menyebabkan berkurangnya ketersediaan makanan ikan serta kondisi perairan yang mengandung racun karena keasaman yang tinggi sehingga tidak mampu mendukung kehidupan makhluk hidup di dalamnya. Hal ini juga berakibat pada menipisnya kadar oksigen di dalam air sehingga banyak ikan yang mati karena kekurangan oksigen dan racun. Burung yang memakan ikan yang terkena dampak berbahaya ini juga akan terakumulasi oleh bahan kimia yang berbahaya dalam tubuhnya, kemudian diteruskan lagi ke hewan pemakan burung tersebut. Dengan demikian, bahan kimia berbahaya akan dimasukkan ke setiap tingkat rantai makanan (Bhargava, 2013).

Kapasitas penetral asam (ANC) dihubungkan dengan kesehatan biota, yang batas kritisnya ditetapkan sebesar 20 $\mu\text{eq/L}$. Apabila nilai ANC berada di atas ambang kritis tersebut, diperkirakan tidak terjadi penurunan populasi ikan trout cokelat dalam jangka panjang. Pada nilai ANC yang nol, populasi ikan trout menurun di 50% danau di Norwegia (Lien *et al.*, 1996). Kehilangan spesies yang sensitif terhadap keasaman di semua tingkat trofik, termasuk produsen primer, makrofita, dan predator puncak seperti ikan dan unggas air, menyebabkan berkurangnya keanekaragaman hayati. Keasaman yang tinggi meningkatkan kelarutan ion aluminium, yang dapat beracun bagi ikan dan menjadi masalah di beberapa danau di Skotlandia pada masa lalu. Efek luas dari tingginya konsentrasi ion H^+ dan Al^{3+} dapat mengganggu produksi telur, keberhasilan penetasan, pengaturan osmosis, dan fungsi insang insang (APIS, 2010).

2. Efek pada Tanaman

Nilai pH tanah yang ideal untuk pertumbuhan tanaman antara 5 dan 8; di luar kisaran pH tersebut, tanaman akan kesulitan untuk berkecambah atau tumbuh. Tanaman tidak akan tumbuh pada pH kurang dari 3,7. Hujan asam tidak menyebabkan kerusakan pada tanaman secara langsung, tetapi secara perlahan akan melemahkan tanaman dengan merusak daunnya, membatasi nutrisi yang tersedia, atau menghasilkan zat beracun yang dilepaskan dari tanah.

Unsur hara penting tanah yang dibentuk oleh nitrogen (N), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan kalium (K) akan berkurang sehingga dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman. Unsur logam seperti aluminium (Al), merkuri (Hg), mangan (Mn), kadmium (Cd), dan timbal (Pb) dalam tanah pada kondisi normal tidak bersifat racun, tetapi jika terjadi hujan asam, unsur-unsur tersebut akan menjadi racun bagi tanah dan menyebabkan kerusakan atau kematian pada tanaman dan pohon (Mohajan, 2018).

Pada tanaman pangan, hujan asam tidak terlalu berpengaruh, karena biasanya petani menambahkan pupuk ke tanah untuk mengganti nutrisi tanah dan menambahkan batu kapur yang akan meningkatkan kemampuan tanah melawan keasaman. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan adanya perlambatan pada pertumbuhan hutan. Daun-daun mudah rontok dan berwarna coklat sebelum waktunya. Hujan asam akan menyapu mineral dari daun dan tanah, serta menyumbat pori-pori daun sehingga daun tidak dapat menyerap karbon dioksida dengan baik.

Akibatnya, pertumbuhan tumbuhan akan terhambat serta mengakibatkan hilangnya daun dan kerusakan kulit kayu. Dalam kasus yang ekstrem, pohon dan sebagian besar tanaman mati tanpa diketahui penyebabnya. Meskipun beberapa tanaman dapat bertahan hidup setelah terkena dampak dari hujan asam, tanaman menjadi lemah dan tidak mampu bertahan dalam bencana alam seperti hujan lebat, angin kencang, dan kekeringan. Kekurangan kalsium pada pohon cemara menyebabkan pohon menjadi kurang tahan terhadap dingin dan mengalami kerusakan, bahkan mati saat musim dingin.

Efek pengasaman pada tanah di Belanda dilaporkan telah memengaruhi beberapa tumbuhan abadi seperti *Arnica* di dataran rendah, yang membuat respons tumbuhan tersebut menjadi kurang sensitif terhadap akumulasi NH_4^+ di dalam tanah. Akumulasi ini terjadi karena nitrifikasi menjadi kurang efektif seiring dengan meningkatnya keasaman tanah (De Graaf et al., 1998).

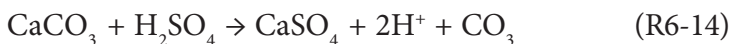
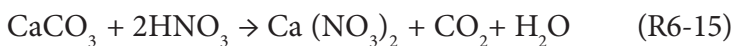
3. Efek pada Tanah

Tanah mengandung unsur mineral berbahaya seperti merkuri dan aluminium, tetapi tidak dapat diserap oleh tanaman sehingga tidak berbahaya. Namun, setelah bereaksi dengan hujan asam, unsur-unsur tersebut membentuk senyawa logam yang berbahaya dan dapat diserap oleh tanaman. Senyawa ini tidak hanya membahayakan tanaman, tetapi juga membahayakan hewan yang memakannya. Sifat biologi dan kimia tanah dapat rusak karena hujan asam. Beberapa mikroba yang bermanfaat pada tanah juga tidak dapat hidup pada pH rendah (Bhargava, 2013).

4. Efek pada Bangunan dan Monumen

Hujan asam menyebabkan kerusakan pada bangunan dari batu kapur dan patung marmer. Saat ini, bahan bangunan sebagian besar menggunakan batu kapur dan marmer. Kedua bahan bangunan tersebut disukai dan banyak digunakan karena tahan lama dalam penggunaannya.

Batu kapur dan marmer mengandung kalsium karbonat (CaCO_3). Meskipun tahan lama, kedua bahan tersebut apabila digunakan sebagai bahan bangunan akan terkikis oleh hujan asam sedikit demi sedikit. Zat asam dalam air hujan akan bereaksi dengan CaCO_3 membentuk kalsium sulfat dan kalsium nitrat yang akan hanyut terbawa air hujan.



Proses ini terjadi pada permukaan bangunan atau monumen dan akan merusak bagian dalam batuan. Tingkat kerusakan dipengaruhi juga oleh jumlah aliran hujan yang mengenai permukaan batuan. Permukaan bangunan yang terkena langsung air hujan akan rentan terhadap erosi apabila dibandingkan dengan bagian yang terlindungi dari aliran air, misalnya di bagian bawah atap (Dubey, 2013).

Dampak dari hujan asam telah ditemukan di beberapa monumen dan bangunan terkenal di dunia, seperti Taj Mahal di India, Katedral St. Paul di London, dan Patung Liberty di New York. Gedung-gedung tinggi berbahan beton di perkotaan mengalami kerusakan akibat terkena air hujan dengan tingkat keasaman tinggi dalam jangka waktu lama. Curah hujan asam dengan tingkat pH berkisar antara 3,0 dan 5,0 telah memengaruhi bangunan dari semen dan beton. Benteng Merah Delhi dan Masjid Jama juga menunjukkan tanda-tanda kerusakan akibat polusi belerang. Hujan asam dapat merusak jendela pada gereja, jembatan baja, dan rel kereta api. Pada umumnya, efek dari hujan asam ini akan menimbulkan korosi pada logam, merusak warna cat, dan membentuk kerak pada permukaan kaca.

5. Efek pada Kesehatan Manusia

Deposisi asam tidak berdampak secara langsung pada manusia. Partikulat yang menyebabkan hujan asam dapat menyebabkan gangguan kesehatan manusia, yaitu masalah pada jantung dan paru-paru termasuk asma dan bronkitis.

Gas SO_2 dan NO_x juga membahayakan kesehatan manusia. Gas-gas ini berinteraksi di atmosfer membentuk partikel sulfat dan nitrat halus yang dapat diangkut dalam jarak jauh oleh angin dan terhirup ke dalam paru-paru manusia. SO_2 dalam bentuk gas dan aerosol dengan konsentrasi di atas 1,6 ppm menyebabkan iritasi mata dan mengganggu pernapasan. Selain itu, SO_2 apabila dikombinasikan dengan aerosol, kabut, dan asap akan membentuk suspensi halus yang dapat menembus paru-paru bagian dalam (Dubey, 2013).

Dampak tidak langsung dari deposisi asam terhadap manusia adalah ketergantungan terhadap ketersediaan tumbuhan, ikan, dan

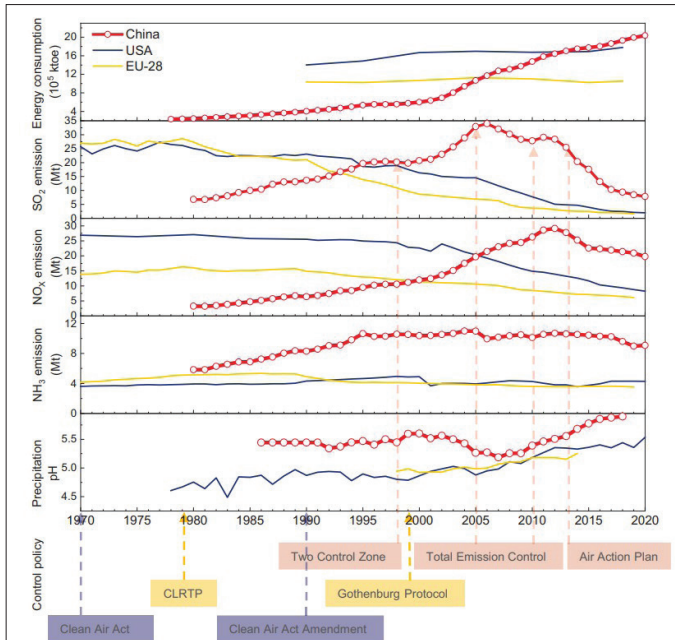
hewan sebagai makanan. Jika jumlahnya menurun karena efek hujan asam, manusia akan kekurangan bahan makanan. Selain itu, jika air tanaman atau hewan terkontaminasi oleh zat asam berbahaya dari hujan asam, kemudian dikonsumsi oleh manusia secara terus-menerus akan menyebabkan gangguan kesehatan manusia, baik gangguan ringan maupun berat hingga menyebabkan kematian.

F. Status Deposisi Asam

Pemantauan yang kontinyu dan kajian dari hasil pemantauan deposisi asam sebagai dasar kebijakan untuk perbaikan kualitas udara suatu wilayah. Menurut laporan dari U.S Environmental Protection Agency (USEPA), 2022, wilayah Amerika Serikat bagian timur memperlihatkan pengurangan deposisi sulfat, baik untuk deposisi basah maupun deposisi kering sebanyak 82% dari tahun 2000–2002 hingga rentang waktu 2020–2022. Penurunan konsentrasi NO_x secara umum lebih besar dibandingkan dengan penurunan deposisi NH_x . Total pengendapan NO_x sebesar 59%, sebaliknya terlihat adanya peningkatan untuk konsentrasi NH_x sebesar 43% dari kurun waktu tahun 2000–2002 hingga 2020–2022.

Kondisi yang serupa juga terjadi di Inggris, dengan konsentrasi keasaman dan sulfat dalam deposisi basah menurun masing-masing sebesar 85% dan 75% selama 20 tahun terakhir. Namun, penurunan ini tidak merata di seluruh Inggris. Daerah *remote* yang lokasinya jauh dari sumber polutan seperti di wilayah Inggris bagian tengah dan timur mengalami penurunan sulfat dalam deposisi basah lebih kecil, yaitu 57% dibandingkan dengan deposisi kering sebesar 93% (APIS, 2010).

Cina saat ini telah berhasil mengurangi emisi polutan yang bersifat asam, meskipun terjadi pertumbuhan ekonomi dan konsumsi energi yang signifikan. Penurunan emisi polutan ini menyebabkan adanya perbaikan tingkat keasaman (pH) air hujan. Namun, risiko terjadinya pengasaman ekologi dan eutrofikasi belum menunjukkan penurunan yang berarti.



Sumber: Yu et al. (2024)

Gambar 6.5 Tren Perkembangan Hujan Asam dan Variabel Terkait di Cina Dibandingkan dengan Eropa (EU-28) dan Amerika Serikat

Meskipun telah terjadi pengurangan emisi, penurunan area yang berisiko terhadap deposisi asam di Cina hanya sebesar 70%, masih tertinggal jauh dibandingkan dengan Eropa dan Amerika Serikat, yaitu sebanyak 20% dan 15% secara berurutan. Hal ini disebabkan oleh strategi pengurangan emisi di Cina berfokus pada peningkatan kualitas udara daripada mitigasi dampak ekologis (Yu et al., 2024).

Kondisi perbaikan kualitas udara dari hasil monitoring deposisi asam di Indonesia belum tampak adanya perbaikan. Berdasarkan hasil pemantauan deposisi asam di Indonesia untuk daerah Serpong, Jakarta, Bandung, Kototabang, dan Maros, pH air hujan menunjukkan tingkat keasaman di bawah nilai pH 5,6 (Puji Lestari et

al., 2008). Menurut laporan EANET (2020), untuk daerah perkotaan di Indonesia dominasi konsentrasi ion NH_4^+ dalam deposisi asam cukup tinggi apabila dibandingkan dengan konsentrasi SO_4^{2-} dan NO_3^- . Untuk deposisi kering dengan pemantauan *filterpack* dari tahun 2015–2019 terlihat adanya kenaikan gas (SO_2 , HNO_3 , HCl , dan NH_3) dan aerosol (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , dan Ca^{2+}) untuk wilayah Bandung, sedangkan untuk wilayah Jakarta dan Serpong mengalami penurunan. Hal ini karena di Jakarta dan Serpong terdapat regulasi Gubernur mengenai transportasi publik termasuk penggunaan bahan bakar fosil, sehingga menyebabkan adanya perbaikan dari kualitas udara di Jakarta dan Serpong.

G. Penutup

Deposisi asam merupakan salah satu dampak dari polusi udara yang disebabkan oleh aktivitas manusia maupun proses alami. Dampaknya tidak hanya terbatas pada lingkungan, tetapi juga pada kesehatan manusia, ekosistem perairan, tanah, serta bangunan dan monumen bersejarah.

Upaya pengendalian emisi zat pencemar seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) sangat penting untuk mengurangi dampak negatif dari deposisi asam. Langkah-langkah seperti penggunaan teknologi ramah lingkungan, pengurangan bahan bakar fosil, serta pemantauan kualitas udara harus terus dioptimalkan. Kesadaran dan peran aktif dari berbagai pihak, baik pemerintah, industri, maupun masyarakat, menjadi kunci utama dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan menciptakan lingkungan yang lebih sehat bagi generasi mendatang.

Daftar Pustaka

- APIS. (2010). Acid deposition. *UK Centre for Ecology & Hydrology*. <https://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/acid-deposition>
- Bhargava, S., & Bhargava, S. (2013). Ecological consequences of the acid rain. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 5(4), 19-24, <https://www.iosrjournals.org>

- Budiwati, T., Setyawati, W., & Tanti, D. A. (2016). Chemical characteristics of rainwater in Sumatra, Indonesia, during 2001–2010. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2016/1876046>
- Carnelos, D. A., Jobbagy, E., & Piñeiro, G. (2024). Rainout and washout contributions to wet atmospheric deposition in Southern South America. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(3). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06991-z>
- De Graaf, M. C. C., Bobbink, R., Roelofs, J. G. M., & Verbeek, P. J. M. (1998). Differential effects of ammonium and nitrate on three heathland species. *Plant Ecology*, 135(2), 185–196. <https://doi.org/10.1023/A:1009717613380>
- Duan, L., Yu, Q., Zhang, Q., Wang, Z., Pan, Y., Larssen, T., Tang, J., & Mulder, J. (2016). Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment*, 146, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.018>
- Dubey, S. (2013). Acid rain—The major cause of pollution: Its causes, effects and solution. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2, [772–775].
- EANET. (2010). Technical manual for wet deposition monitoring in East Asia -2010. *Network Center for EANET*. <https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2019/04/techwet.pdf>
- Fatima, F. (2021). A review on acid rain: An environmental threat. *Pure and Applied Biology*, 10(1), [301–310]. <https://doi.org/10.19045/bspab.2021.100032>
- Ferlita, S., Sudarti, & Yushardi. (2023). Analisis efisiensi kendaraan listrik sebagai salah satu transportasi ramah lingkungan pengurang emisi karbon. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 356–365. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3282>
- How does dry deposition contribute to the overall problem of acid deposition? (2025). Sustainability Directory. <https://pollution.sustainability-directory.com/learn/how-does-dry-deposition-contribute-to-the-overall-problem-of-acid-deposition/>
- Iavorivska, L., Boyer, E. W., & DeWalle, D. R. (2016). Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation. *Atmospheric Environment*, 146, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.006>

- Indrawati, A., Tanti, D. A., Budiwati, T., & Sumaryati. (2019). The distribution of rainwater acidity in Bandung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012037>
- Lien, L., Raddum, G. G., Fjellheim, A., & Henriksen, A. (1996). A critical limit for acid neutralizing capacity in Norwegian surface waters, based on new analyses of fish and invertebrate responses. *Science of the Total Environment*, 177(1–3), 173–193. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04894-4](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04894-4)
- Mohajan, H. K. (2018). Acid rain is a local environment pollution but global concern. *Open Science Journal of Analytical Chemistry*, 3(5), [47–55]. <http://www.openscienceonline.com/journal/osjac>
- Payus, C. M., Jikilim, C., & Sentian, J. (2020). Rainwater chemistry of acid precipitation occurrences due to long-range transboundary haze pollution and prolonged drought events during southwest monsoon season: Climate change driven. *Heliyon*, 6(9), Article e04997. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04997>
- Prakash, J., Agrawal, S. B., & Agrawal, M. (2023). Global trends of acidity in rainfall and its impact on plants and soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(1), 398–419. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01051-z>
- Wondyfraw, M. (2014). Mechanisms and effects of acid rain on environment. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 5(6), [204]. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000204>
- Yu, Q., Ge, X., Zheng, H., Xing, J., Duan, L., Lv, D., Ding, D., Dong, Z., Sun, Y., Maximilian, P., Xie, D., Zhao, Y., Zhao, B., Wang, S., Mulder, J., Larssen, T., & Hao, J. (2024). A probe into the acid deposition mitigation path in China over the last four decades and beyond. *National Science Review*, 11(4). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae007>