

Dampak Hujan Asam Pada Lingkungan

The Impact of Acid Rain on The Environment

Mochammad Imam Indra Gumirat¹, Dodi Satriawan^{2*}, Dewi Wahyuningtyas³

^{1,2} Program Studi D4 Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap

³ Jurusan Teknik Kimia, Institut Sains dan Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Email: lmiiigtegar@gmail.com, dodi.satriawan@pnc.ac.id, dewi.wahyuningtyas@akprind.ac.id

*Penulis korespondensi: dodi.satriawan@pnc.ac.id

Direview: 6 Oktober 2021

Diterima: 11 November 2021

ABSTRAK

Istilah hujan asam mengacu pada deposisi atmosfer yang mengandung senyawa asam yang turun ke bumi dalam bentuk hujan, salju, partikulat, gas dan uap dan memberikan berdampak negatif pada bumi. Hujan asam pertama kali dikenalkan oleh Ducros (1845) dan kemudian dijelaskan oleh ahli kimia Inggris Robert Angus Smith (1852) yang studi penelitiannya menghubungkan sumber-sumber terjadinya hujan asam dengan emisi industri dan termasuk pengamatan awal dari efek lingkungan yang terjadi kerusakan. Artikel ini ringkas cakupan hujan asam dengan memberikan kemajuan ilmiah terbaru mengenai bagaimana emisi, deposisi, dan tren temporal polutan yang menyebabkan hujan asam bervariasi di seluruh dunia. Kemajuan yang cukup besar dalam mengurangi emisi SO₂ dan NO_x terlihat jelas di seluruh Amerika Utara dan Eropa. Sebaliknya, penurunan SO₂ dimulai hanya sekitar 10 tahun yang lalu di Cina dan penurunan emisi NO_x hanya dalam beberapa tahun terakhir. Sedangkan di bagian lain Asia seperti India, emisi ini terus meningkat. Investigasi senyawa kimia yang terkontaminasi pada air permukaan, tanah, ikan, dan vegetasi menunjukkan bahwa pemulihannya lambat dan akan terungkap selama beberapa dekade dengan pertimbangan emisi dan deposisi terus menurun. Apakah ekosistem yang terkena dampak akan kembali ke kondisi hujan asam saat ini belum dapat dipastikan dan kemungkinan akan bergantung pada banyak faktor lain seperti gangguan manusia dan bencana alam serta perubahan iklim. Mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana hujan asam berinteraksi dengan berbagai faktor yang mempengaruhi lintasan ekosistem tetap menjadi tantangan bagi komunitas ilmiah untuk ditangani.

Kata kunci: Hujan asam, emisi SO₂, emisi NO_x, ekosistem, lingkungan (*Times New Roman, 10pt, italic*)

ABSTRACT

The term acid rain refers to the deposition of the atmosphere containing acidic compounds that fall to the earth in the form of rain, snow, particulates, gases and vapors and have a negative impact on the earth. Acid rain was first introduced by Ducros (1845) and later described by the English chemist Robert Angus Smith (1852) whose research studies linked the sources of acid rain to industrial emissions and included early observations of the damaging environmental effects. This article summarizes the scope of acid rain by providing the latest scientific advances on how emissions, deposition, and temporal trends of the pollutants that cause acid rain vary around the world. Considerable progress in reducing SO₂ and NO_x emissions is evident throughout North America and Europe. In contrast, the decline in SO₂ started only about 10 years ago in China and the decline in NO_x emissions only in the last few years. While in other parts of Asia such as India, these emissions continue to increase. Investigations of chemical contaminants in surface water, soil, fish, and vegetation show that recovery is slow and will unfold over decades as emissions and depositions continue to decline. Whether the affected ecosystems will return to their current acid rain conditions is uncertain and will likely depend on many other factors such as human disturbance and natural disasters and climate change. Gaining a better understanding of how acid rain interacts with

various factors that affect ecosystem trajectories remains a challenge for the scientific community to address.

Keywords: Acid rain, SO₂ emission, NO_x emission, ecosystem, environment.

1. PENDAHULUAN

Istilah hujan asam mengacu pada deposisi atmosfer yang mengandung senyawa asam yang turun kebumi dalam bentuk hujan, salju, partikulat, gas dan uap dan memberikan berdampak negatif pada bumi. Hujan asam pertama kali dikenalkan oleh Ducros (1845) dan kemudian dijelaskan oleh ahli kimia Inggris Robert Angus Smith (1852) yang studi penelitiannya menghubungkan sumber-sumber terjadinya hujan asam dengan emisi industri dan termasuk pengamatan awal dari efek lingkungan yang terjadi kerusakan (Abbasi et al., 2013). Penemuan Smith sebagian besar dilupakan hingga pertengahan abad ke-20 ketika pengamatan mulai menghubungkan polusi udara dengan pengendapan sulfat (SO₄²⁻) di atmosfer dan senyawa kimia lainnya, yang terjadi di dekat pabrik peleburan logam di Sudbury, Ontario, Kanada, dan kemudian di lokasi Eropa, Amerika Utara, dan Australia (Black et al., 2014).

Pemahaman sekarang yang lebih maju tentang hujan asam sebagai masalah lingkungan yang sebagian besar disebabkan oleh emisi regional sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x). Penemuan ini berasal dari hasil pengamatan pada tahun 1960-an dan awal 1970-an di Swedia oleh Svante Oden (Abbasi et al., 2013; Keller et al., 2013), dan di Amerika Utara oleh Gene Likens dan Borman (Lal, 2020). Hasil dari penemuan tersebut memberikan arah bagi peneliti untuk menunjukkan hubungan antara emisi dari pembangkit listrik tenaga batu bara dan sumber industri lainnya, dan mendokumentasikan efek lingkungan dari hujan asam seperti terjadinya pengasaman air permukaan dan efek toksik pada vegetasi, ikan, dan biota lainnya.

Karya para pionir inilah yang pertama kali menarik perhatian pemerintah, pembuat kebijakan, media, dan masyarakat umum tentang perlunya mengatasi masalah terjadinya hujan asam, yang memberikan dorongan untuk peraturan polusi udara yang ketat di beberapa negara khususnya Amerika Utara dan Eropa yang memimpin terlebih dulu untuk melakukan penurunan emisi SO₂ dan emisi NO_x di seluruh wilayah pemerintahan. Hujan asam dikenal dan dijelaskan di Asia lebih belakangan daripada di Amerika Utara dan Eropa (Bhargava & Bhargava, 2017; Zhang et al., 2012). Demikian pula, penurunan emisi SO₂ dan NO_x dimulai lebih belakangan di Asia daripada di Amerika Utara dan Eropa, dan di beberapa negara Asia seperti India, emisi SO₂ dan NO_x terus meningkat (Wu et al., 2016).

Pengamatan di wilayah lain yang tersebar di dunia menunjukkan bahwa peningkatan kadar sulfur (S) dan deposisi nitrogen (N) terjadi secara lokal atau regional di dekat fasilitas pembakaran industri atau batubara (Wang et al., 2017; Wei et al., 2020) termasuk melawan arah angin di lingkungan laut (Reis et al., 2012). Emisi amonia (NH₃) dan amonium (NH₄) juga dikenal luas sebagai kontributor pengasaman ekosistem (Bhargava & Bhargava, 2017). Penelitian selanjutnya mengungkapkan deposisi N di atmosfer selanjutnya diakui sebagai sumber nutrisi penting bagi ekosistem perairan dan kontributor eutrofikasi muara (Leduc et al., 2013).

Meskipun hujan asam tidak lagi menjadi trending topik di media Amerika Utara dan Eropa, para ilmuwan terus mengamati dan mempelajari tingkat pengendapan serta status pemulihan ekosistem di banyak wilayah. Memang, banyak kemajuan ilmiah telah dibuat dalam beberapa tahun terakhir seperti meningkatnya pemahaman kita tentang peran tanah dalam penanganan pemulihan ekosistem, mengungkap berbagai faktor yang mempengaruhi bagaimana biota merespons tingkat pengendapan yang lebih rendah, dan mendokumentasikan laju ekosistem dalam pemulihan. Hujan asam merupakan salah satu eksperimen yang menunjukkan gangguan ekosistem skala hemisfer yang tidak disengaja yang memerlukan studi berkelanjutan. Pengamatan baru memberi informasi kepada para ilmuwan tentang kapasitas ekosistem untuk pemulihan dari efek hujan asam. Selain itu, semakin dikenalnya hubungan polutan udara seperti merkuri (Hg), ozon (O₃) dengan SO₂ dan NO_x, dapat mengakibatkan pemicu utama hujan asam.

Artikel ini mewakili informasi terbaru tentang status hujan asam di seluruh dunia, sejauh mana ekosistem yang terkena dampak pulih atau kemungkinan akan pulih dari dampak hujan asam, dan interaksi hujan asam dengan ekosistem lainnya, polusi, perubahan iklim, dan siklus karbon. Artikel ini membahas deposisi atmosfer dan kimia serta membahas efek ekosistem dari hujan asam. Artikel ini menyoroti tema ilmiah umum yang melampaui wilayah geografis serta menekankan perbedaan regional utama dalam pola pengendapan, efek ekosistem, dan kebijakan polusi udara.

2. METODE PENELITIAN

Banyaknya informasi terbaru tentang status hujan asam di seluruh dunia, sejauh mana ekosistem yang terkena dampak pulih atau kemungkinan akan pulih dari dampak hujan asam, dan interaksi hujan asam dengan ekosistem lainnya. polusi, perubahan iklim, dan siklus karbon. Artikel ini merupakan artikel review dari berbagai jurnal tentang dampak hujan asam di berbagai negara.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di Amerika Utara dan Eropa, konsentrasi dan beban presipitasi SO_4^{2-} telah menurun sejak tahun 1970-an atau 1980-an. Hal ini ditunjukkan melalui penelitian oleh (Abbasi et al., 2013) di Pegunungan Adirondack di timur laut Amerika Serikat; (Galloway et al., 2013) di Ontario, Kanada; (Carpenter et al., 2011) di Prancis, dan (Hasler et al., 2016) di wilayah pegunungan Swiss dan Italia. Pola temporal dalam deposisi NO_3^- dalam studi ini telah menunjukkan pola yang berbeda dari SO_4^{2-} dengan penurunan konsentrasi dan beban hanya terlihat sejak awal atau abad ke-21 (Abbasi et al., 2013; Kumar, 2017). Dalam beberapa kasus, penurunan konsentrasi NO_3^- presipitasi tidak terlihat meskipun penurunan emisi NO_x menunjukkan bahwa perubahan kimia atmosfer dapat mempengaruhi pola jangka panjang (Kumar, 2017). Meskipun tren penurunan yang kurang jelas dalam deposisi NO_3^- di atmosfer, (Abbasi et al., 2013; Galloway et al., 2013; Hasler et al., 2016; Kumar, 2017) ini menunjukkan bahwa pH presipitasi telah meningkat persepuluh hingga hampir semua di seluruh Amerika Utara bagian timur dan Eropa selatan.

Saat ini, tingkat deposisi S dan N atmosfer tertinggi di bumi terjadi di beberapa bagian (Kumar, 2017), dan penelitian yang telah dilakukan pada wilayah ini sangat menarik bagi komunitas ilmiah. Pola temporal deposisi asam di Asia menunjukkan kesamaan yang dilaporkan di Amerika Utara dan Eropa dengan ada beberapa perbedaan penting. Emisi SO_2 dan NO_x yang terjadi di Asia tidak mengalami penurunan hingga baru-baru ini dibandingkan dengan Eropa dan Amerika Utara, Emisi yang terjadi di Asia konsisten dengan tren yang dilaporkan dalam deposisi atmosfer SO_4^{2-} dan NO_3^- . Di Jepang dan Korea Selatan, penurunan emisi SO_2 dan presipitasi konsentrasi SO_4^{2-} telah terjadi sejak tahun 1990-an. Sedangkan di Cina penurunan emisi SO_2 dan presipitasi konsentrasi SO_4^{2-} dimulai tahun 2005 (Kumar, 2017). Emisi NO_x mulai mencapai puncaknya di Cina hingga 2012, dan sejauh ini, penurunan deposisi NO_3^- tidak mengalami penurunan (Liu et al., 2019). Karena Negara Cina merupakan sumber besar penghasil emisi N yang mempengaruhi pola deposisi di daerah yang melawan arah angin, penurunan deposisi NO_3^- di atmosfer belum mengalami penurunan di lokasi terpencil di Jepang (Liu et al., 2019).

Di Asia Tenggara dan India, emisi SO_2 dan NO_x terus meningkat (Wei et al., 2020), tetapi kurangnya catatan deposisi atmosfer jangka panjang tidak memungkinkan generalisasi tentang tren penyebaran emisi ini. Aspek lain dari pengendapan emisi di atmosfer pada beberapa bagian Asia juga berbeda dari pengendapan emisi di atmosfer di Amerika Utara bagian timur dan Eropa. Sebagai contoh, pengendapan di Cina utara dipengaruhi oleh daerah padang pasir di timur yang menghasilkan massa udara dengan konsentrasi partikulat yang tinggi. Saat massa udara ini bergerak ke barat melintasi wilayah dengan emisi S dan N yang tinggi, sebagian besar deposisi S dan N jatuh sebagai partikulat kering (Wei et al., 2020). Selain itu, pH presipitasi lebih tinggi untuk tingkat deposisi S dan N tertentu di Cina utara dan di beberapa bagian India karena netralisasi oleh konsentrasi kation basa yang tinggi seperti kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) (Zheng et al., 2017). Akhirnya, pengukuran kimia presipitasi di bagian terpencil Asia di dasar Gunung Everest menunjukkan beberapa pengaruh sumber pembakaran bahan bakar fosil, meskipun kimia presipitasi lebih encer daripada di sebagian besar Asia (Zheng et al., 2017).

Afrika Selatan juga mengalami hujan asam, terutama di lokasi yang dekat dengan fasilitas pembakaran bahan bakar fosil (Du et al., 2014). Selain itu di India, pembakaran biomassa juga merupakan sumber penyumbang emisi penting N dan S serta senyawa konstituen lainnya. Data yang disajikan dari kedua wilayah ini menunjukkan bahwa banyak negara berkembang mengalami efek hujan asam. Pemantauan lanjutan kimia deposisi di negara berkembang sangat disarankan untuk menginformasikan kebijakan kualitas udara (Hansson & Hirsch Hadorn, 2016).

Emisi amonia (NH_3) dan deposisi atmosfer dari pengurangan N sebagai amonium (NH_4^+) telah mendapat perhatian yang meningkat dalam beberapa tahun terakhir karena emisi NO_x dan deposisi NO_3^- telah menurun di banyak daerah. Pengurangan N sebagian besar berasal dari sumber pertanian seperti aplikasi pupuk yang berbeda dengan sumber pembakaran bahan bakar fosil yang dominan SO_2 dan NO_x (Abbasi et al., 2013). Deposisi atmosfer NH_4^+ dan NO_3^- tidak selalu dianggap sebagai penyumbang hujan asam. Namun, komponen hidrogen siap dilepaskan sebagai H^+ oleh proses ekosistem siklus N yang menunjukkan peran penting dalam pengasaman. Beberapa artikel (Abbasi et al., 2013; Black et al., 2014;

Rosi-Marshall et al., 2016) menyebutkan bahwa deposisi N terdiri dari peningkatan proporsi N tereduksi di banyak lokasi di seluruh dunia yang dapat diakibatkan oleh penurunan konsentrasi NO_3^- atau peningkatan konsentrasi N tereduksi.

(Zheng et al., 2017) menyimpulkan bahwa tren peningkatan terbaru dalam deposisi kering NO_3^- dan deposisi basah NH_4^+ di AS tidak disebabkan oleh peningkatan emisi NO_3^- , melainkan oleh penurunan emisi SO_2 dan NO_x , yang membentuk lebih sedikit $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dan Partikulat NH_4NO_3 yang mendorong konsentrasi dalam deposisi. Hal ini didukung juga oleh pernyataan (Liu et al., 2019) yang menyatakan bahwa proses fisikokimia atmosfer dapat menjelaskan beberapa tren yang diamati dalam deposisi N di atmosfer.

Beberapa artikel membahas konstituen pengendapan atmosfer yang umumnya tidak dianggap sebagai komponen hujan asam. (Abbasi et al., 2013) menunjukkan tren Hg dalam curah hujan dan dalam beberapa bentuk deposisi kering di Maryland, Amerika Serikat, dan secara umum menemukan tren penurunan selama 2007-2018 yang konsisten dengan tren penurunan deposisi S dan N. Hal ini disebabkan karena dorongan oleh peraturan pemerintah yang membatasi emisi dari pembangkit listrik tenaga batu bara. (Abbasi et al., 2013) memberikan kompilasi dan sintesis data konsentrasi karbon organik presipitasi dari seluruh dunia, yang dapat membantu dalam studi anggaran karbon.

(Liu et al., 2019) menyebutkan unsur organik dan karbon di tiga lokasi di Jepang merupakan campuran pembakaran dan sumber pembakaran biomassa yang tergantung pada lokasi dan musim. (Liu et al., 2019) melaporkan pengukuran hidroperoksida dengan menggunakan helikopter di sebuah kota di Jepang dan mengeksplorasi korelasi dengan SO_2 dan konstituen lain yang memberikan saran terhadap sumber dan lintasan emisi umum serta peran hidroperoksida dalam oksidasi SO_2 menjadi SO_4^{2-} .

Akhirnya, (Zheng et al., 2017) melaporkan metode untuk memperkirakan deposisi debu *aeolian* ke tumpukan salju di Pegunungan Rocky, Amerika Serikat. Peningkatan deposisi debu *aeolian* telah diamati di banyak wilayah, dan beberapa efek lingkungan telah dicatat (Liu et al., 2019). Misalnya, partikel debu mempengaruhi keasaman lapisan salju dan melalui efek *albedo*, waktu pencairan salju di Pegunungan Rocky.

3.1. Efek ekosistem dari hujan asam

Kebijakan kualitas udara yang diterapkan di Amerika Utara dan Eropa dalam beberapa dekade terakhir dan juga baru-baru ini di beberapa bagian Asia, telah mengakibatkan penurunan deposisi S dan N atmosfer yang dijelaskan sebelumnya. Kebijakan ini dirancang untuk meminimalkan kerusakan lebih lanjut dari hujan asam dan untuk mempromosikan pemulihan ekosistem dari efek merusak. (Kumar, 2017) melaporkan tren indikator kimia di perairan permukaan Amerika Utara yang menginformasikan keberhasilan pemerintah didalam kebijakan kualitas udara dalam mempromosikan pemulihan perairan ekosistem. (Abbasi et al., 2013) melaporkan bahwa konsentrasi SO_4^{2-} telah menurun $> 2 \mu\text{eq/L/tahun}$ di 48 danau yang dipantau di Pegunungan Adirondack, Amerika Serikat selama 1992-2015. Konsentrasi nitrat telah menurun di sebagian besar danau ini, pada tingkat sekitar enam kali lipat kurang dari konsentrasi SO_4^{2-} .

Indikator pengasaman utama, kapasitas penetral asam, pH, dan aluminium monomer anorganik (Al_i) semuanya menunjukkan peningkatan substansial di sebagian besar danau di Pegunungan Adirondack, Amerika Serikat yang dipantau. (Zheng et al., 2017) melaporkan penurunan signifikan dalam konsentrasi SO_4^{2-} dan NO_3^- pada 40 aliran sungai di Maryland bagian barat, Amerika Serikat selama 1999-2017. Tren konsentrasi SO_4^{2-} ini lebih kecil daripada di Adirondacks, yang mungkin mencerminkan perbedaan kapasitas adsorpsi SO_4^{2-} pada tanah di antara kedua wilayah ini, sedangkan tren NO_3^- lebih besar di Maryland, yang mungkin mencerminkan perbedaan regional dalam proses siklus N. Bagaimanapun, aliran sungai di Maryland menunjukkan sedikit pemulihan kapasitas penetral asam dengan peningkatan yang signifikan pada kondisi $< 20\%$. Tingkat pemulihan pengasaman di Maryland yang lebih rendah daripada di Adirondacks mungkin mencerminkan efek gabungan dari perbedaan regional dalam pengendapan atmosfer, tanah, atau proses netralisasi antara sungai di Maryland dan danau di Adirondacks.

melaporkan tren aliran kimia di dua lokasi di Ontario, Kanada selama 1980-2015. (Abbasi et al., 2013) umumnya menemukan pemulihan pH, kapasitas penetral asam, dan Al_i yang terbatas, yang mana hasilnya menunjukkan hasil yang lebih mirip dengan sungai Maryland daripada danau Adirondack. (Abbasi et al., 2013) juga melaporkan bahwa iklim atau musim yang lebih banyak mendominasi kekeringan atau panas memainkan peran penting dalam pengasaman aliran jangka pendek. (Kumar, 2017) menggunakan korelasi silang untuk menggambarkan kelambatan dalam konsentrasi zat terlarut aliran terhadap perubahan deposisi basah berdasarkan catatan jangka panjang di Pennsylvania, Amerika Serikat, yang mungkin menjelaskan

sebagian dari respons ekosistem yang kurang baik. Ekosistem yang kurang baik pemulihan ini, mencerminkan respon yang lama dari desorpsi tanah terhadap penurunan deposisi SO_4^{2-} dan waktu transit yang lama dari presipitasi selama transportasi melalui tanah resapan dan air tanah sebelum mengalir ke badan sungai.

Pengasaman air permukaan terjadi di beberapa bagian Jepang dan Cina seperti yang dipaparkan oleh (Kumar, 2017), tetapi umumnya tidak terlalu parah di Asia dibandingkan di Amerika Utara dan Eropa. Deposisi kation basa tingkat tinggi yang dikombinasikan dengan denitrifikasi dan adsorpsi SO_4^{2-} di Asia merupakan penyebab utama atas pengasaman air permukaan yang kurang ekstensif di wilayah ini. Meskipun demikian, pengasaman tanah telah dilaporkan di Cina dan Jepang, yang kemungkinan terjadi di daerah dengan tingkat pelapukan mineral yang rendah (Kumar, 2017). (Yan et al., 2017) menunjukkan penurunan luas pH tanah di tanah berhutan Cina yang rata-rata 0,36 unit selama periode 25 tahun dimulai pada 1980-an, dengan penurunan sebesar 0,64 unit di Cina barat daya. Pengasaman tanah ini sebagian besar didorong oleh pengendapan asam, dengan kontribusi kecil dari pemanenan hutan (Yan et al., 2017).

Mengingat pemulihan polutan kimia yang terkontaminasi pada air permukaan yang terbatas di Amerika Utara, pola pemulihan populasi ikan yang sama sederhananya di perairan yang peka terhadap asam seharusnya tidak memberikandampak yang besar. (Yan et al., 2017) melaporkan bahwa kekayaan spesies ikan dan jumlah total ikan tidak meningkat selama 1984-2015 di 43 dari 48 danau di Adirondacks. Sebaliknya, (Kumar, 2017) melaporkan bahwa kepadatan ikan *trout* coklat meningkat secara paralel dengan peningkatan pH, kapasitas penetral asam, dan Al_i selama 1987-2017 di sungai di Norwegia. Bagaimanapun, kepadatan ikan telah bervariasi selama periode ini dan telah menunjukkan kepekaan terhadap gangguan seperti peningkatan pengendapan garam laut ke sungai. (Yan et al., 2017) menjelaskan tren 30 tahun di beberapa metrik ikan di danau ($n = 750$) dan sungai ($n = 1029$) di Swedia yang mencakup daerah berkapur dan tidak berkapur. (Kumar, 2017) menemukan pemulihan yang kuat dalam kekayaan spesies dan keberadaan ikan *trout* coklat di perairan berkapur, tetapi sedikit pemulihan dan beberapa tren menurun di perairan yang tidak memiliki konsentrasi kapur. Penemuan ini menunjukkan nilai potensial dari remediasi untuk mempercepat pemulihan ekosistem di mana proses pemulihan alami yang terbukti lambat.

Ketertarikan pada siklus N berasal dari pentingnya N sebagai nutrisi kunci dan agen pengasaman, dan partisipasinya dalam banyak proses biogeokimia kompleks yang dapat menyebabkan pergeseran unsur kimia, keuntungan atau kerugian ekosistem, dan perubahan keanekaragaman hayati tanaman. Siklus N diteliti melalui penambahan eksperimental, pengukuran isotop, dan pemantauan untuk mengidentifikasi pola temporal dalam konsentrasi dan beban. Emisi gas nitrogen dioksida (NO_2) dapat terdiri dari komponen signifikan dari total deposisi N ke ekosistem, yang dapat meningkatkan pengasaman dan eutrofikasi (Satriawan, 2018). (Kumar, 2017) mengevaluasi tren temporal dalam konsentrasi NO_2 atmosfer di seluruh Kanada selama 1998-2017. Sebagian besar lokasi menunjukkan tren penurunan tajam dalam konsentrasi NO_2 , yang sebagian besar disebabkan oleh kebijakan pemerintah Kanada didalam peraturan yang menekankan untuk menurunkan emisi dari sektor transportasi.

(Kumar, 2017) menjelaskan hasil dari percobaan penambahan N jangka panjang ke daerah aliran sungai di West Virginia, Amerika Serikat. Perlakuan ini mengubah komposisi spesies vegetasi rerumputan dan menurunkan ketersediaan Ca^{2+} dan Mg^{2+} . (Zheng et al., 2017) menjelaskan hasil untuk ^{15}N di lingkaran pohon, konsentrasi aliran NO_3^- , dan retensi N atmosfer di dua daerah aliran sungai yang berdekatan di Adirondacks. Pola bervariasi antara daerah aliran sungai dan tren isotop cincin lingkaran pohon dan aliran N di daerah aliran sungai sebagian besar tidak sama dengan penurunan deposisi N atmosfer regional. Hasil penelitian (Satriawan, 2018) menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti penurunan deposisi HS serta gangguan hutan mungkin telah mempengaruhi pola temporal yang diamati. (Kumar, 2017) menunjukkan bahwa penurunan baru-baru ini dalam deposisi NO_3^- di atmosfer ke daerah aliran sungai dataran tinggi berhutan di Sungai Potomac Atas, Amerika Serikat cukup untuk memperhitungkan penurunan beban N sungai ke Teluk Chesapeake, yang menunjukkan bahwa peraturan yang dibuat pemerintah didalam penurunan polusi udara berkontribusi terhadap peningkatan status trofik muara ini.

Sebuah beban kritis mewakili tingkat deposisi atmosfer yang bila terlampaui dapat menyebabkan kerusakan pada komponen ekosistem. Konsep ini diterapkan secara luas di seluruh dunia untuk menginformasikan pembuat kebijakan dan pengelola ekosistem tentang tingkat pengendapan atmosfer yang diperlukan untuk melindungi spesies atau komunitas biologis, atau memberi saran pemulihan ekosistem yang sebelumnya terkena dampak. (Zheng et al., 2017) menilai beban kritis kondisi tunak dari keasaman untuk sekitar 90.000 danau di utara Saskatchewan, Kanada yang berlawanan arah angin dari wilayah pasir Athabasca dan menemukan bahwa 12% dari danau ini menerima deposisi S atmosfer yang melebihi beban

kritis untuk efek ekosistem yang mengalami kerusakan. (Kumar, 2017) mengembangkan pendekatan yang dimodifikasi untuk mengevaluasi beban kritis keadaan tunak dari keasaman menggunakan 260 danau di wilayah yang sama di Saskatchewan utara, tetapi menemukan bahwa pemantauan deposisi atmosfer tidak cukup untuk sepenuhnya mengevaluasi risiko pengasaman. (Abbasi et al., 2013) menunjukkan pendekatan diagnostik di mana pelampauan beban kritis saat ini untuk tanah dan air permukaan dievaluasi di dua wilayah British Columbia, Kanada, serta pendekatan preskriptif yang menilai sejauh mana sumber emisi SO₂ dan NO_x yang direncanakan di masa depan dapat menyebabkan pelampauan beban kritis. (Zheng et al., 2017) mengeksplorasi spesies vegetasi melintasi gradien deposisi N atmosfer di Irlandia dan menyimpulkan bahwa kelimpahan spesies dipengaruhi oleh tingkat yang saat ini direkomendasikan oleh *the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*. Hasil (Abbasi et al., 2013) menunjukkan bahwa tingkat beban kritis yang direkomendasikan saat ini mungkin tidak cukup untuk mendukung strategi perlindungan keanekaragaman hayati di Uni Eropa.

Terakhir, hujan asam juga telah terbukti berdampak pada sumber daya bangunan budaya dengan mempercepat pelapukan bangunan dan patung yang berada pada luar ruangan. (Zheng et al., 2017) mengembangkan pendekatan baru untuk mempelajari tingkat pelapukan patung marmer dan perunggu dan mengunjungi kembali dua studi kasus dari tahun 1980-an di Amerika Serikat bagian timur untuk menunjukkan bahwa pengendapan polutan S dan N berkontribusi pada dampak negatif pada pelapukan yang lebih besar daripada endapan senyawa basah.

4. KESIMPULAN

Artikel ini menunjukkan secara ringkas cakupan penyelidikan hujan asam dengan memberikan kemajuan ilmiah terbaru mengenai bagaimana emisi, deposisi, dan tren temporal polutan yang menyebabkan hujan asam bervariasi di seluruh dunia. Kemajuan yang cukup besar dalam mengurangi emisi SO₂ dan NO_x terlihat jelas di seluruh Amerika Utara dan Eropa. Sebaliknya, penurunan SO₂ dimulai hanya sekitar 10 tahun yang lalu di Cina dan penurunan emisi NO_x hanya dalam beberapa tahun terakhir. Sedangkan di bagian lain Asia seperti India, emisi ini terus meningkat. Investigasi senyawa kimia yang terkontaminasi pada air permukaan, tanah, ikan, dan vegetasi menunjukkan bahwa pemulihannya lambat dan akan terungkap selama beberapa dekade dengan pertimbangan emisi dan deposisi terus menurun. Apakah ekosistem yang terkena dampak akan kembali ke kondisi hujan asam saat ini belum dapat dipastikan dan kemungkinan akan bergantung pada banyak faktor lain seperti gangguan manusia dan bencana alam serta perubahan iklim. Mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana hujan asam berinteraksi dengan berbagai faktor yang mempengaruhi lintasan ekosistem tetap menjadi tantangan bagi komunitas ilmiah untuk ditangani. Eksperimen hujan asam yang tidak disengaja terus memberikan peluang untuk mempelajari efek jangka panjang dari polutan udara pada ekosistem darat dan perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, T., Poornima, P., Kannadasan, T., & Abbasi, S. A. (2013). Acid rain: past, present, and future. *International Journal of Environmental Engineering*, 5(3), 229. <https://doi.org/10.1504/ijee.2013.054703>
- Bhargava, S., & Bhargava, S. (2017). Ecological consequences of The Acid rain. *Over The Rim*, 5(4), 19–24. <https://doi.org/10.2307/j.ctt46nrzt.12>
- Black, B. A., Lamarque, J. F., Shields, C. A., Elkins-Tanton, L. T., & Kiehl, J. T. (2014). Acid rain and ozone depletion from pulsed siberian traps magmatism. *Geology*, 42(1), 67–70. <https://doi.org/10.1130/G34875.1>
- Carpenter, S. R., Stanley, E. H., & Vander Zanden, M. J. (2011). State of the world's freshwater ecosystems: Physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environment and Resources*, 36(1), 75–99. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021810-094524>
- Du, Y. J., Wei, M. L., Reddy, K. R., Liu, Z. P., & Jin, F. (2014). Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 271, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.02.002>
- Galloway, J. N., Church, M. R., & Norton, S. A. (2013). Freshwater acidification from atmospheric deposition of sulfuric acid. *Environmental Science and Technology*, 17(11), 541–545. <https://doi.org/10.1021/es00117a723>
- Hansson, S. O., & Hirsch Hadorn, G. (2016). Introducing the Argumentative Turn in Policy Analysis. In

- Logic, Argumentation and Reasoning* (Vol. 10). https://doi.org/10.1007/978-3-319-30549-3_2
- Hasler, C. T., Butman, D., Jeffrey, J. D., & Suski, C. D. (2016). Freshwater biota and rising pCO₂. *Ecology Letters*, 19(1), 98–108. <https://doi.org/10.1111/ele.12549>
- Keller, W., Gunn, J. M., & Yan, N. D. (2013). Acid rain - Perspectives on lake recovery. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 6(3), 207–216. <https://doi.org/10.1023/A:1009983318502>
- Kumar, S. (2017). Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects and Solution. *International Journal of Applied Chemistry*, 13(1), 53–58.
- Lal, N. (2020). Acid Rain And Plant Damage - Effects Of Acid Rain On Plant Growth. *e-Journal of Science & Technology*, May. <https://www.gardeningknowhow.com/plant-problems/environmental/acid-rain-damage.htm>
- Leduc, A. O. H. C., Munday, P. L., Brown, G. E., & Ferrari, M. C. O. (2013). Effects of acidification on olfactory-mediated behaviour in freshwater and marine ecosystems: A synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1627), 20120447. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0447>
- Liu, Z., Yang, J., Zhang, J., Xiang, H., & Wei, H. (2019). A bibliometric analysis of research on acid rain. *Sustainability*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113077>
- Reis, S., Grennfelt, P., Klimont, Z., Amann, M., ApSimon, H., Hettelingh, J. P., Holland, M., LeGall, A. C., Maas, R., Posch, M., Spranger, T., Sutton, M. A., & Williams, M. (2012). From acid rain to climate change. *Atmospheric Science*, 338(6111), 1153–1154. <https://doi.org/10.1126/science.1226514>
- Rosi-Marshall, E. J., Bernhardt, E. S., Buso, D. C., Driscoll, C. T., & Likens, G. E. (2016). Acid rain mitigation experiment shifts a forested watershed from a net sink to a net source of nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(27), 7580–7583. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607287113>
- Satriawan, D. (2018). Analisis Kuantitatif Acidity Level Sebagai Indikator Kualitas Air Hujan di Kabupaten Cilacap. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 3(2), 112–116. <http://ejournal.upbatam.ac.id>
- Wang, Z., Zhu, Z., Sun, X., & Wang, X. (2017). Deterioration of fracture toughness of concrete under acid rain environment. *Engineering Failure Analysis*, 77, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.02.013>
- Wei, H., Liu, Y., Xiang, H., Zhang, J., Li, S., & Yang, J. (2020). Soil ph responses to simulated acid rain leaching in three agricultural soils. *Sustainability*, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su12010280>
- Wu, J., Liang, G., Hui, D., Deng, Q., Xiong, X., Qiu, Q., Liu, J., Chu, G., Zhou, G., & Zhang, D. (2016). Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China. *Science of the Total Environment*, 544, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.025>
- Yan, W., Ditao, N., & Zhanping, S. (2017). Effect of acid rain erosion on steel fiber reinforced concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 32(1), 121–128. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1569-y>
- Zhang, X., Jiang, H., Jin, J., Xu, X., & Zhang, Q. (2012). Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method. *Atmospheric Environment*, 46(x), 590–596. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.004>
- Zheng, K., Li, H., Wang, L., Wen, X., & Liu, Q. (2017). Pyrite oxidation under simulated acid rain weathering conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(27), 21710–21720. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9804-9>