
Warisan Bencana DuPont: PFAS Bahan Kimia Abadi

Muhammad Lathiful Khuluq, Muhammad Rafly Haryansyah, & Syarifah Hikmah
Julinda Sari[✉]
Universitas Brawijaya

ABSTRAK

Per- dan polifluoroalkil (PFAS), yang dikenal sebagai "bahan kimia abadi," merupakan kelompok kontaminan sintesis yang sangat persisten dan sulit terurai di lingkungan. Penelitian ini mengkaji dampak PFAS, khususnya PFOA dan PFOS, terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, serta menguraikan awal mula kesadaran akan bahaya PFAS dari kasus perusahaan DuPont. Studi ini menggunakan metode studi literatur dari berbagai sumber untuk menjelaskan sifat kimia PFAS, cara penyebarannya, serta dampaknya pada kesehatan manusia dan lingkungan. Pada 1950-an, DuPont menggunakan PFOA dalam produksi Teflon. Pengungkapan oleh Rob Bilott pada 1999 menjadi titik balik penting yang membuka tabir bahaya PFAS setelah ditemukan pencemaran air minum yang mempengaruhi penduduk di Parkersburg, AS. Pencemaran PFAS berdampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan sehingga pengendaliannya memerlukan peran sektor pemerintah, industri dan masyarakat.

Kata kunci: PFAS, DuPont, Kesehatan, Lingkungan, Pencemaran

The Legacy of DuPont's Disaster: PFAS Forever Chemicals

ABSTRACT

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), known as "forever chemicals," are a group of synthetic contaminants that are highly persistent and difficult to degrade in the environment. This study examines the impact of PFAS, particularly PFOA and PFOS, on human health and the environment, as well as outlines the origins of awareness regarding the dangers of PFAS through the case of the DuPont company. This study employs a literature review method from various sources to explain the chemical properties of PFAS, their pathways of dispersion, and their impacts on human health and the environment. In the 1950s, DuPont used PFOA in the production of Teflon. The revelation by Rob Bilott in 1999 became a pivotal turning point that unveiled the dangers of PFAS after drinking water contamination was discovered, affecting residents in Parkersburg, USA. PFAS contamination poses risks to both human health and the environment, necessitating collaborative efforts from the government, industry, and community sectors to effectively manage and mitigate its impact.

Keywords: PFAS, DuPont, Health, Environment, Contamination

PENDAHULUAN

Produk-produk kemasan makanan, peralatan masak, serta berbagai pakaian tahan air yang sering digunakan oleh masyarakat umumnya mengandung bahan PFAS (Per- dan polifluoroalkil). Meski produksi PFAS di AS dimulai sejak 1950-an dengan fokus utama pada perfluorooctanoic acid (PFOA) dan perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), informasi mengenai jumlah produksi dan

formulasi produk ini secara historis tidak tersedia secara publik (Podder et al., 2021). PFAS adalah bahan kimia sintesis yang memiliki kemampuan persisten terhadap minyak dan air, tahan terhadap suhu tinggi dan bahan kimia, serta mampu menjadi surfaktan. Beberapa PFAS rantai panjang, termasuk PFOA dan PFOS, sangat persisten di lingkungan dan cenderung terakumulasi dalam makhluk

[✉] Corresponding author
Address : Malang, Jawa Timur
Email : syarifahsari@ub.ac.id

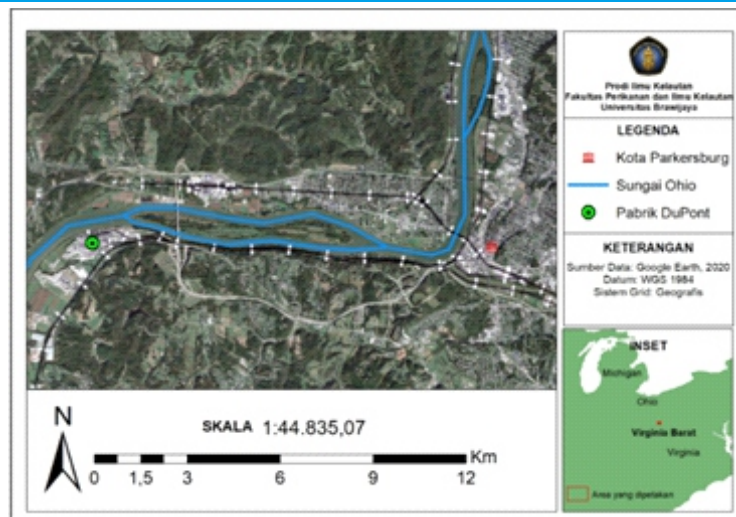
hidup (Fragki et al., 2021). PFAS memang mampu dikeluarkan dari tubuh manusia melalui ekskresi manusia berbentuk urin, tapi bahan kimia ini terbukti dapat terakumulasi dalam jaringan manusia (Jian et al., 2018). PFAS dalam tubuh manusia memiliki waktu paruh sekitar 2,3 hingga 8,5 tahun (K. Li et al., 2017).

Sifat PFAS yang persisten dan mampu terakumulasi dalam tubuh dapat membahayakan kesehatan manusia maupun lingkungan. Paparan PFAS pada manusia dikaitkan dengan gangguan hormon dan penurunan fungsi sistem imun (Dalsager et al., 2016). Penelitian menunjukkan adanya hubungan positif antara paparan prenatal terhadap PFOS dan PFOA dengan peningkatan kejadian demam pada anak-anak usia 1-4 tahun, mendukung hipotesis bahwa paparan PFAS dapat memiliki efek imunotoksik dan meningkatkan risiko infeksi pada masa kanak-kanak (Dalsager et al., 2016). IARC (International Agency for Research on Cancer) juga menetapkan PFOA pada kategori "*possibly carcinogenic to humans*" (Grup 2B), berdasarkan bukti terbatas yang menunjukkan bahwa zat ini mungkin menyebabkan kanker testis dan ginjal pada manusia, serta data terbatas dari penelitian pada hewan (Bartell & Vieira, 2021). Kontaminasi PFAS juga berdampak cukup serius pada ekosistem, terutama perairan. Senyawa ini dapat terakumulasi pada ikan dan spesies laut lainnya yang dikonsumsi manusia (Gómez et al., 2021). Penelitian Bilela et al. (2023) juga mengungkapkan bahwa adanya potensi mikroplastik memiliki kemampuan untuk menyerap PFAS yang dapat meningkatkan toksisitas dan penyebaran PFAS di rantai makanan laut, yang pada akhirnya dapat mencapai manusia.

PFAS adalah kelas besar bahan kimia berfluorinasi. PFAS memiliki sifat hidrofobik dan lipofobik di lingkungan dan sangat persisten karena kekuatan ikatan karbon-fluorin. Dua kelas bahan kimia PFAS yang banyak digunakan, yaitu PFOS dan PFOA. PFOA digunakan

dalam pembuatan politetrafluoroetilena yang lebih dikenal sebagai teflon, sedangkan bahan kimia PFOS umum digunakan sebagai busa pemadam kebakaran, bahan tahan air, pelapis anti noda untuk karpet, kain, dan kemasan makanan, serta dalam beberapa produk elektronik. Perbedaan PFOA dan PFOS terdapat pada struktur kimianya, PFOA memiliki struktur kimia berbasis rantai karbon yang terdiri dari delapan atom karbon, dengan gugus asam karboksilat di ujung rantai, sedangkan PFOS memiliki rantai yang serupa dengan delapan atom karbon, tetapi dengan gugus sulfonat di ujung rantai, bukan asam karboksilat seperti PFOA. Kesamaan dari PFOA dan PFOS terdapat pada basis rantai karbon yang terdiri dari delapan atom karbon sehingga kedua senyawa ini dapat dinamakan dengan C8.

PFOA adalah bahan kimia yang ditemukan dalam banyak produk rumah tangga, seperti Teflon, yang dikenal karena kemampuannya mencegah karat dan daya rekatnya [pada bahan. Terlepas dari keunggulan ini, PFOA memiliki sifat yang sulit terurai di lingkungan, dan dapat terakumulasi dalam tubuh manusia. Akumulasi ini biasanya terjadi pada organ seperti hati, dan dianggap berkontribusi pada gangguan metabolisme termasuk diabetes. Penelitian pada hewan telah menunjukkan bahwa paparan PFOA dapat memicu masalah metabolisme, salah satunya adalah resistensi insulin, yaitu tubuh menjadi kurang responsif terhadap insulin. Selain itu, PFOA juga dapat mengganggu fungsi sel beta pankreas yang berperan dalam produksi insulin, sehingga meningkatkan risiko diabetes (Putri & Ilyas, 2021). Pencemaran PFOA tidak hanya berdampak pada kesehatan akan tetapi lingkungan juga terkena dampaknya yakni pada cacing tanah yang memiliki peran penting untuk kesuburan tanah. Cacing tanah tercemar oleh mikroplastik yang memiliki kapasitas untuk menyerap polutan organik seperti PFOA dari lingkungan. Mereka bertindak sebagai vektor yang memfasilitasi transfer



Sumber: Data Sekunder Diolah, (2024)

Gambar 1

Peta Lokasi Pencemaran PFOA oleh DuPont di Parkersburg

PFOA ke organisme seperti cacing tanah, sehingga meningkatkan akumulasi PFOA dalam tubuh organisme yang terpapar (Sobhani et al., 2021).

Studi literatur ini bertujuan untuk memberikan pemahaman bahaya dari per- dan polifluoroalkil (PFAS) terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Fokusnya adalah membahas keterlibatan DuPont dalam bencana pencemaran PFAS dan menjelaskan sifat kimia PFAS yang persisten dan berpotensi membahayakan, khususnya PFOA dan PFOS. Literatur ini juga menjelaskan bagaimana senyawa PFOA dan PFOS dapat terakumulasi pada tubuh manusia dan ekosistem. Selain itu, pembahasan ini juga mengeksplorasi potensi bahaya PFAS terhadap gangguan neurologis dan penelitian terkait peran mikroplastik sebagai vektor transfer PFAS ke organisme.

METODE PENELITIAN

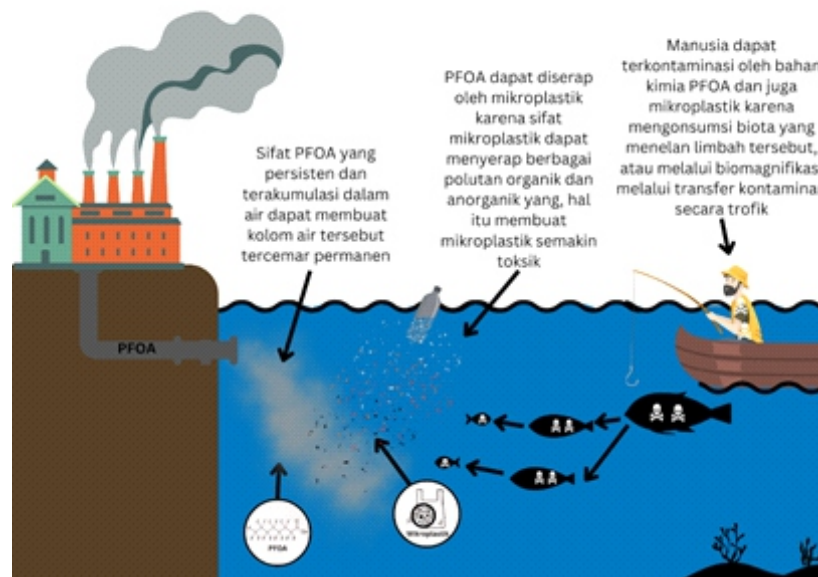
Studi ini merupakan studi literatur yang bersumber dari artikel, buku, dan dokumen resmi. Metode pengumpulan data yang dipakai yakni studi literatur yang merupakan metode pengumpulan sumber-sumber yang berkaitan dengan topik penelitian (Habsy, 2017). Penelitian ini tidak membatasi informasi yang diperoleh asal informasi tersebut relevan dengan topik penelitian ini, maka dari itu penelitian ini menggunakan lebih dari 30

sumber yang sangat relevan dengan menggunakan kata kunci "PFOA". Data yang terkumpul kemudian dianalisis menggunakan metode analisis deskriptif. Metode analisis deskriptif merupakan pendekatan yang digunakan untuk menganalisis, menggambarkan dan meringkas berbagai kondisi dan situasi berdasarkan data-data yang terkumpul (Lindawati & Hendri, 2016).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pencemaran PFOA apabila masuk ke kolom perairan dapat menyebabkan perairan tersebut tercemar permanen karena sifat dari PFOA. Dapat dilihat dari Gambar 2.

PFAS adalah kelompok senyawa kimia sintesis yang sangat stabil dan sulit terurai, sehingga sering disebut sebagai "bahan kimia abadi" atau "*forever chemicals*" (Spyrou et al., 2024).. Terdapat sekitar 118 jenis PFAS yang masih diproduksi dan beredar di pasar Amerika Serikat, dengan perkiraan produksi mencapai 85.000 ton per tahun, dan 50% di antaranya dilepaskan ke lingkungan (Sinclair et al., 2020). Pencemaran PFAS jenis PFOA terbesar dimulai ketika perusahaan DuPont mulai membeli PFOA dari 3M untuk digunakan dalam produksi Teflon Pada tahun 1951. 3M, yang menemukan PFOA empat tahun sebelumnya, menggunakan zat ini untuk



Sumber: Dokumentasi Pribadi, (2024)

Gambar 2

Proses Pencemaran PFOA ke Lingkungan

mencegah penggumpalan lapisan Teflon selama produksi. Meskipun belum diklasifikasikan sebagai zat berbahaya, 3M memberikan instruksi kepada DuPont untuk membuang PFOA dengan cara yang aman, seperti dibakar atau dikirim ke fasilitas pengolahan limbah kimia. DuPont sendiri melarang pembuangan PFOA ke air permukaan atau saluran pembuangan, namun, selama beberapa dekade, DuPont justru membuang ratusan ribu pon bubuk PFOA melalui pipa pembuangan di fasilitas Parkersburg ke Sungai Ohio. Perusahaan juga membuang 7.100 ton lumpur yang terkontaminasi PFOA ke lubang terbuka tanpa ada lapisan yang melindungi, yang memungkinkan bahan kimia ini meresap ke dalam tanah. Akibat dari pembuangan ini, limbah PFOA milik perusahaan DuPont mencemari air tanah lokal yang menjadi sumber air minum bagi lebih dari 100.000 penduduk di Parkersburg, Vienna, Little Hocking, dan Lubeck. Pada tahun 1961, peneliti DuPont menemukan bahwa PFOA dapat memperbesar hati pada tikus dan kelinci, dan setahun kemudian mengkonfirmasi hasil tersebut pada anjing. Pada tahun 1970-an, DuPont mendapati kadar PFOA yang tinggi

dalam darah pekerja pabriknya, namun mereka tidak melaporkannya kepada EPA.

Pada tahun 1981, 3M menemukan bahwa PFOA menyebabkan cacat lahir pada tikus dan membagikan temuan ini kepada DuPont, kemudian melakukan tes pada anak-anak dari karyawan yang hamil. Bucky Bailey, seorang anak laki-laki yang ibunya, Sue, bekerja di pabrik Teflon saat awal kehamilannya, lahir dengan sejumlah kelainan fisik. Kelainan fisik yang dialami Bucky antara lain cacat pada saluran air mata, satu lubang hidung, dan kelopak mata yang letaknya tidak normal di dekat hidung. Bucky juga mengalami "pupil lubang kunci," yang iris matanya terlihat robek (Martin, 2023), seperti yang dapat terlihat pada (Gambar 3). Pada tahun 1984, DuPont mengetahui bahwa debu PFOA dari pabriknya telah menyebar jauh di luar area properti dan juga mencemari pasokan air lokal, namun mereka menolak untuk mempublikasikan temuan ini. Pada tahun 1991, ilmuwan DuPont menetapkan batas aman internal untuk konsentrasi PFOA dalam air minum, yaitu satu bagian per miliar. DuPont menemukan bahwa air di salah satu distrik lokal mengandung kadar



Sumber: Haynes (2019)

Gambar 3
Bucky Bailey

PFOA tiga kali lipat dari batas tersebut, tetapi tetap tidak mengungkapkan informasi ini ke publik tersebut (Rich, 2016).

Pada tahun 1999, Rob Bilott, seorang pengacara lingkungan, mengungkapkan dokumen internal yang menunjukkan bahwa DuPont telah menyembunyikan informasi tentang dampak kesehatan PFOA selama beberapa dekade. Ini memicu gugatan class-action besar-besaran pada tahun 2001, yang mengungkap kontaminasi yang meluas di komunitas sekitar. Pada tahun 2005, DuPont membayar denda sebesar \$16,5 juta kepada EPA karena gagal melaporkan bahaya PFOA. Beberapa perusahaan kemudian sepakat untuk menghentikan produksi PFOA pada tahun 2006, tetapi dampak kesehatan tetap menjadi masalah serius. Studi kesehatan yang dilakukan C8 Science Panel pada tahun 2013 mengkonfirmasi hubungan antara paparan PFOA dengan sejumlah penyakit, termasuk kanker ginjal dan testis. Pada tahun 2015, DuPont membayar \$343 juta sebagai bagian dari penyelesaian gugatan class-action, yang dilanjutkan dengan tambahan \$671 juta pada tahun 2017 setelah ribuan tuntutan hukum diajukan (Liu et al., 2021). Berikut merupakan rangkaian dari kronologi bencana pencemaran PFOA yang

dilakukan oleh DuPont.

Kasus pencemaran senyawa perfluorooctanoic acid (PFOA) yang dilakukan oleh perusahaan DuPont telah menjadi salah satu contoh yang mencolok tentang dampak industri kimia terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam kejadian ini, peran tiga pihak, yaitu pemerintah, industri, dan masyarakat dijelaskan pada tabel 1.

Pencemaran PFAS juga terjadi di berbagai tempat di seluruh dunia. Sebagai contoh, Kondisi PFAS pencemaran di Tehran, ibukota Iran, menunjukkan tingkat yang serius. PFAS ditemukan dalam lindi (*leachate*) dari tempat pembuangan akhir (TPA) di Kompleks Aradkuh, yang merupakan pusat utama pengolahan dan pembuangan limbah di kota ini. Zat ini berasal dari berbagai produk rumah tangga dan industri yang dibuang tanpa pemisahan yang memadai. Studi ini menunjukkan bahwa konsentrasi PFAS lebih tinggi pada lindi yang telah berumur dibandingkan dengan lindi segar, dengan enam jenis PFAS terdeteksi, di mana Perfluorobutanesulfonic acid (PFBS) memiliki konsentrasi tertinggi, mencapai 32,5 µg/L. Sementara itu, laguna evaporasi tercatat sebagai lokasi dengan kadar PFAS tertinggi, yaitu 20,2 µg/L. Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi signifikan antara kadar

Tabel 1

Peran 3 Pihak Dalam Kejadian Pencemaran PFOA oleh Perusahaan DuPont

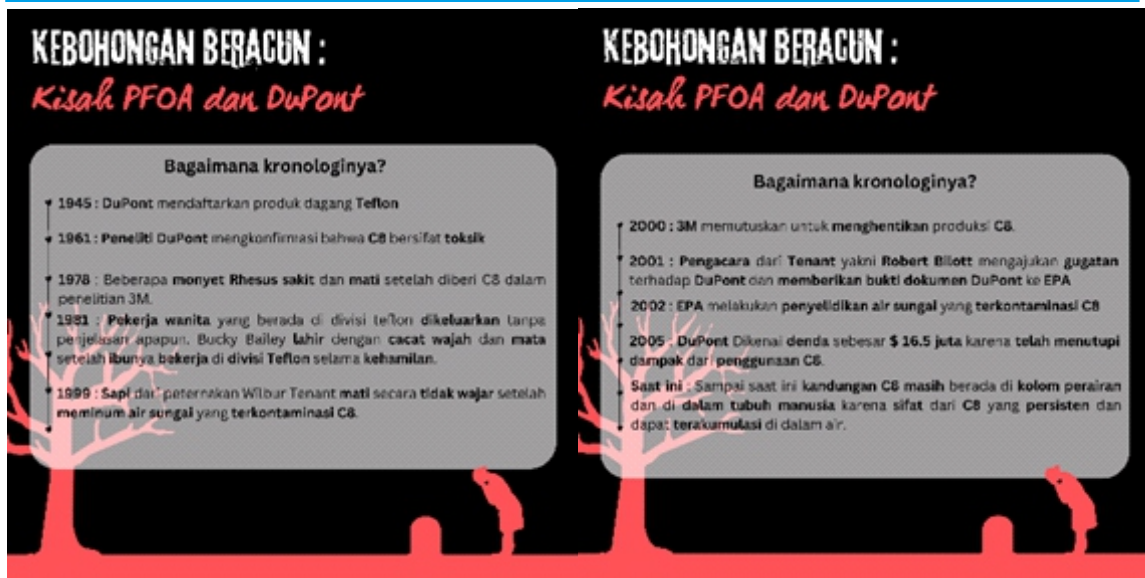
Pihak	Peran
Pemerintah	Regulasi dan Pengawasan : Keterlambatan dalam menetapkan PFOA sebagai zat berbahaya dan dalam menerapkan regulasi ketat, meskipun akhirnya menetapkan batas aman PFOA dalam air minum. Penyelidikan dan Tuntutan Hukum : EPA menuntut DuPont pada 2005 dan menetapkan denda \$16,5 juta. Upaya Pembersihan : Bekerjasama dalam pemulihan air minum dan upaya pembersihan di daerah terdampak.
Industri	Penemuan dan Produksi PFOA : DuPont menggunakan PFOA dalam pembuatan teflon, meskipun mengetahui dampak kesehatannya sejak 1960-an. Pembuangan Limbah : DuPont membuang PFOA ke Sungai Ohio dan tanah sekitarnya meskipun ada instruksi untuk tidak melakukannya. Penutupan Informasi : DuPont tidak memberitahukan EPA tentang studi kesehatan internal terkait resiko PFOA. Penyelesaian Hukum : DuPont akhirnya setuju membayar denda \$343 juta dalam gugatan cedera pribadi dan denda EPA.
Masyarakat	Whistleblower dan Pengacara : Rob Bilott, seorang pengacara lingkungan, memimpin investigasi dan gugatan terhadap DuPont. Tekanan Publik : Komunitas terdampak melakukan aksi protes, advokasi, dan menggugat secara class-action. Kesadaran dan Edukasi : Masyarakat menyebarkan informasi tentang bahaya PFOA dan meningkatkan kesadaran tentang dampak kimia beracun. Pemantauan Lingkungan : Komunitas mulai aktif memantau kualitas air dan tanah untuk mendeteksi kontaminasi lebih lanjut.

Sumber: Data Sekunder Diolah, (2024)

PFAS dengan beberapa parameter fisikokimia seperti klorida ($R^2=0,95$), konduktivitas listrik ($R^2=0,88$), minyak dan lemak ($R^2=0,87$), serta *chemical oxygen demand* (COD) ($R^2=0,58$). Peningkatan kadar PFAS dalam lindi yang lebih tua menunjukkan bahwa zat ini mengalami pelepasan secara bertahap dari material limbah selama proses dekomposisi '(Rasouli et al., 2025).

Danau Hulun di China mengalami

pencemaran oleh zat per- dan polifluoroalkil (PFAS). Pencemaran ini berasal dari berbagai sumber seperti limbah domestik dan industri, *aqueous film-forming foams* (AFFFs), tekstil, kemasan makanan berbasis kertas, serta produk kosmetik. Total konsentrasi PFAS dalam air danau Hulun berkisar antara 3.67 hingga 8.84 ng/L, sementara dalam sedimen mencapai 0.97 hingga 1.73 mg/kg. PFAS yang dominan dalam air



Sumber: Data Sekunder Diolah, (2024)

Gambar 4

Kronologi Skandal PFOA DuPont

adalah perfluorooctanoat (PFOA) dengan rata-rata 1.20 ng/L, sementara dalam sedimen, perfluorooctane sulfonat (PFOS) menjadi yang paling dominan dengan rata-rata 0.20 mg/kg. Sungai Hailar menjadi sumber utama pencemaran, menyumbang sekitar 99.74% dari total aliran massa PFAS ke danau dengan perkiraan sebesar 15.05 kg per tahun -(J. Li et al., 2025).

PFAS tersusun atas beberapa senyawa, di antaranya yang paling umum adalah PFOA (perfluorooctanoic acid) dan PFOS (perfluorooctane sulfonate). PFOA dan PFOS dikenal karena penggunaannya dalam berbagai produk seperti wadah makanan cepat saji, pakaian tahan air, busa pemadam kebakaran berbasis air, bahan cat, karpet tahan noda, dan teflon anti lengket (Jahnke & Berger, 2009; Post et al., 2012; Steenland et al., 2010; Xiao et al., 2015). Kedua senyawa ini sangat resisten terhadap degradasi, dengan waktu paruh di lingkungan masing-masing lebih dari 92 tahun untuk PFOA dan lebih dari 41 tahun untuk PFOS, yang berarti mereka hampir tidak akan terurai dalam kondisi lingkungan alami (Blum, 2015). Zat-zat ini juga diketahui menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan endokrin dan risiko kanker, serta dapat menimbulkan cacat lahir.

PFAS dapat terserap oleh mikroplastik di lingkungan bebas, hal ini terjadi karena mikroplastik memiliki kemampuan untuk menyerap berbagai polutan organik dan anorganik di lingkungan, termasuk PFAS (Llorca et al., 2018; Wang et al., 2015). Studi menunjukkan bahwa mikroplastik dapat berfungsi sebagai vektor pemfasilitas perpindahan PFAS di lingkungan (Xu et al., 2024). Perpindahan PFAS ke lingkungan menyebabkan pencemaran di ekosistem air, seperti sungai, estuari, dan laut, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan, sehingga meningkatkan risiko kontaminasi pada sumber pangan dan air. PFOA yang sulit terurai juga terakumulasi dalam tubuh hewan, manusia, serta lingkungan, yang berpotensi memicu dampak negatif bagi kesehatan ekologis dan manusia (Wee & Aris, 2023). Selain itu, sifatnya yang persisten menyebabkan paparan terus-menerus meskipun dalam kadar rendah, terutama di dekat area industri, tempat pelatihan kebakaran, dan lokasi pembuangan limbah, yang memperparah kontaminasi air minum (Teaf et al., 2019). PFOA juga berperan pada penyebaran gen resistensi antibiotik (ARGs), yang menimbulkan risiko besar bagi ekologi dan kesehatan masyarakat (Chen et al., 2022).

PFAS yang mencemari badan air

tawar masuk ke rantai makanan di berbagai tingkat trofik. Air limbah yang terkontaminasi yang digunakan untuk irigasi serta pembuangan lumpur yang mengandung PFAS juga menjadi salah satu sumber utama (Dhore & Murthy, 2021). PFOS dan berbagai sulfonat organik perfluorinated terkait telah terdeteksi di ikan, burung, dan mamalia. Kekhawatiran masyarakat terhadap bahan pencemar ini meningkat setelah sejumlah penelitian menunjukkan bahwa PFOS dan PFOA dapat menimbulkan dampak kesehatan yang buruk pada hewan percobaan, seperti kerusakan hati, gangguan tumbuh kembang, gangguan neurobehavioral, gangguan sistem kekebalan, gangguan reproduksi, masalah pada paru-paru, perubahan hormon, serta kemungkinan genotoksisitas dan potensi karsinogenik yang rendah (Squadrone et al., 2015).

PFOS (Perfluorooctane Sulfonate) dan PFOA (Perfluorooctanoic Acid) diketahui sebagai bahan kimia PFAS yang paling umum ditemukan dalam sampel darah manusia, PFAS pada tubuh manusia akan berikatan dengan protein serum atau plasma. Konsentrasi PFOS dan PFOA lebih banyak ditemukan dalam serum dan plasma manusia dibandingkan darah utuh (Jian et al., 2018). Paparan PFAS pada manusia dilaporkan melalui air minum, konsumsi makanan yang terkontaminasi, bahan pembungkus makanan serta inhalasi udara yang terkontaminasi, dengan jalur oral menyumbang lebih dari 85% paparan (Kotthoff et al., 2020; Sadia et al., 2023). PFAS memiliki kemampuan menembus sawar darah otak dan menyebabkan senyawa PFAS ditemukan di otak dan cairan serebrospinal manusia. Paparan PFAS di otak manusia dikaitkan dengan gangguan kognitif dan perilaku seperti cerebral palsy kongenital, gangguan memori, *Attention Deficit Hyperactivity Disorder* (ADHD), dan disabilitas intelektual, yang sangat berdampak pada perkembangan janin dan anak-anak (Skogheim et al., 2020). Salah satu mekanisme utamanya adalah gangguan pada sistem dopamin, di mana PFAS

merusak masa pertumbuhan neuron dopaminergik, mengurangi ekspresi transporter dopamin (DAT) dan enzim tyrosine hydroxylase (TH), yang berperan penting dalam produksi dopamin. Akibatnya, fungsi otak terkait pengaturan suasana hati, proses pembelajaran, dan memori terganggu (Di Nisio et al., 2022). Paparan PFAS juga berdampak pada perubahan struktural neuron, termasuk peningkatan percabangan sel saraf, yang dapat mengganggu jaringan saraf dan berkontribusi pada perkembangan saraf yang terganggu (Panieri et al., 2022). Pada dosis rendah, senyawa seperti PFOA dapat meningkatkan kadar serotonin dan dopamin, tetapi pada dosis tinggi, terjadi penurunan kadar norepinefrin dan glutamat, yang kemudian mengakibatkan ketidakseimbangan neurokimia dan gangguan perilaku. PFAS juga memicu peningkatan risiko apoptosis (kematian sel yang terprogram), khususnya pada sel-sel otak, yang dapat berkontribusi pada neurodegeneratif seperti alzheimer dan parkinson (Mastrantonio et al., 2018).

Pencegahan dan penanganan PFAS membutuhkan pendekatan komprehensif, mulai dari pengurangan sumber, pemantauan ketat, hingga metode pengolahan yang efektif. Upaya pencegahan dapat dimulai dengan mengurangi penggunaan produk yang mengandung PFAS dalam industri dan rumah tangga, seperti kemasan makanan, tekstil tahan air, dan busa pemadam kebakaran. Regulasi yang lebih ketat juga perlu diterapkan terhadap industri yang membuang limbah mengandung PFAS ke pengolahan air limbah. Pemantauan lingkungan secara berkala diperlukan untuk mendeteksi keberadaan PFAS dalam air, tanah, dan udara. Selain itu, pengembangan teknologi pengolahan limbah yang efektif untuk menghilangkan atau mengurangi konsentrasi PFAS menjadi langkah penting dalam upaya penanganan jangka panjang. (Alukkal et al., 2025).

SIMPULAN

Studi ini menyoroti dampak yang ditimbulkan oleh pencemaran PFAS, khususnya PFOA dan PFOS, yang digunakan oleh DuPont dalam produksi Teflon. Pencemaran ini menjadi perhatian global setelah pengungkapan oleh Rob Bilott, yang mengungkap dampak serius pencemaran air minum bagi lebih dari 100.000 penduduk. PFAS tidak hanya merusak ekosistem dan rantai makanan dengan bioakumulasi dan biomagnifikasi, tetapi juga memiliki efek buruk pada kesehatan manusia, seperti gangguan neurologis, endokrin, dan peningkatan risiko penyakit kanker. Selain itu, peran mikroplastik sebagai vektor fasilitator perpindahan PFAS di alam memperburuk masalah ini. Sehingga diperlukan langkah efektif dalam penggantian bahan PFAS pada alat-alat khususnya alat rumah tangga yang lebih ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alukkal, C. R., Modiri, M., Ruiz, R. A., Choi, Y. J., & Lee, L. S. (2025). Evaluation of PFAS extraction and analysis methods for biosolids. *Talanta*, 286(October 2024), 127485. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127485>
- Bartell, S. M., & Vieira, V. M. (2021). Critical review on PFOA, kidney cancer, and testicular cancer. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 71(6), 663–679. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1909668>
- Bilela, L. L., Matijošytė, I., Krutkevičius, J., Alexandrino, D. A. M., Safarik, I., Burlakovs, J., Gaudêncio, S. P., & Carvalho, M. F. (2023). Impact of per- and polyfluorinated alkyl substances (PFAS) on the marine environment: Raising awareness, challenges, legislation, and mitigation approaches under the One Health concept. *Marine Pollution Bulletin*, 194(July). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115309>
- Blum, A. (2015). The Madrid Statement on Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs). *Environmental Health Perspectives*, 123(5), A107–A111. <https://doi.org/10.1021/es201662b.Fei>
- Chen, C., Fang, Y., Cui, X., & Zhou, D. (2022). Effects of trace PFOA on microbial community and metabolisms: Microbial selectivity, regulations and risks. *Water Research*, 226(September), 119273. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119273>
- Dalsager, L., Christensen, N., Husby, S., Kyhl, H., Nielsen, F., Høst, A., Grandjean, P., & Jensen, T. K. (2016). Association between prenatal exposure to perfluorinated compounds and symptoms of infections at age 1–4 years among 359 children in the Odense Child Cohort. *Environment International*, 96, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.08.026>
- Dhore, R., & Murthy, G. S. (2021). Per/polyfluoroalkyl substances production, applications and environmental impacts. *Bioresource Technology*, 341(August), 125808. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125808>
- Di Nisio, A., Pannella, M., Vogiatzis, S., Sut, S., Dall'Acqua, S., Rocca, M. S., Antonini, A., Porzionato, A., De Caro, R., Bortolozzi, M., De Toni, L., & Foresta, C. (2022). Impairment of human dopaminergic neurons at different developmental stages by perfluoro-octanoic acid (PFOA) and differential human brain areas accumulation of perfluoroalkyl chemicals. *Environment International*, 158(August 2021), 106982. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106982>
- Fragki, S., Dirven, H., Fletcher, T., Grasl-Kraupp, B., Bjerre Gützow, K., Hoogenboom, R., Kersten, S., Lindeman, B., Louisse, J., Peijnenburg, A., Piersma, A. H., Princen, H. M. G., Uhl, M., Westerhout, J., Zeilmaker, M. J., & Luijten, M. (2021). Systemic PFOS and

- PFOA exposure and disturbed lipid homeostasis in humans: what do we know and what not? *Critical Reviews in Toxicology*, 51(2), 141–164. <https://doi.org/10.1080/10408444.2021.1888073>
- Gaber, N., Bero, L., & Woodruff, T. J. (2023). The Devil they Knew: Chemical Documents Analysis of Industry Influence on PFAS Science. *Annals of Global Health*, 89(1), 1–17. <https://doi.org/10.5334/aogh.4013>
- Gómez, V., Torres, M., Karásková, P., Příbylová, P., Klánová, J., & Pozo, K. (2021). Occurrence of perfluoroalkyl substances (PFASs) in marine plastic litter from coastal areas of Central Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 172(August), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112818>
- Habsy, B. A. (2017). Seni Memahami Penelitian Kuliatif Dalam Bimbingan Dan Konseling : Studi Literatur. *JURKAM: Jurnal Konseling Andi Matappa*, 1(2), 90. <https://doi.org/10.31100/jurkam.v1i2.56>
- Haynes, T. (2019). *Dark Waters*. Focus Features.
- Jahnke, A., & Berger, U. (2009). Trace analysis of per- and polyfluorinated alkyl substances in various matrices-How do current methods perform? *Journal of Chromatography A*, 1216(3), 410–421. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.08.098>
- Jian, J. M., Chen, D., Han, F. J., Guo, Y., Zeng, L., Lu, X., & Wang, F. (2018). A short review on human exposure to and tissue distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs). *Science of the Total Environment*, 636, 1058–1069. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.380>
- Kotthoff, M., Fliedner, A., Rüdel, H., Göckener, B., Bücking, M., Biegel-Engler, A., & Koschorreck, J. (2020). Per- and polyfluoroalkyl substances in the German environment – Levels and patterns in different matrices. *Science of the Total Environment*, 740, 140116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140116>
- Li, J., Li, X., Zhu, Y., Wang, L., Ren, S., An, R., Zhang, Q., & Wang, G. (2025). The first survey of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in Hulun Lake, China: Occurrence, sources, and environmental impacts. *Emerging Contaminants*, 11(1), 100431. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100431>
- Li, K., Gao, P., Xiang, P., Zhang, X., Cui, X., & Ma, L. Q. (2017). Molecular mechanisms of PFOA-induced toxicity in animals and humans: Implications for health risks. *Environment International*, 99, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.014>
- Lindawati, S., & Hendri, M. (2016). Penggunaan Metode Deskriptif Kualitatif Untuk Analisis Strategi Pengembangan Kepariwisata Kota Sibolga Provinsi Sumatera Utara. *Seminar Nasional APTIKOM (SEMNASTIKOM), Hotel Lombok Raya Mataram*, 833–837.
- Liu, Z., Li, X., & Shi, S. (2021). An Ethical Analysis Model to DuPont's PFOA Event Based on Consequentialism Perspective. *Proceedings of the 2021 International Conference on Enterprise Management and Economic Development (ICEMED 2021)*, 178(Icemed), 143–149. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.210601.025>
- Llorca, M., Schirinzi, G., Martínez, M., Barceló, D., & Farré, M. (2018). Adsorption of perfluoroalkyl substances on microplastics under environmental conditions. *Environmental Pollution*, 235, 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.075>
- Martin, V. St. (2023). 'Profit Over the Public's Health': Study Details Efforts by Makers of Forever Chemicals to Hide Their Harms. Inside Climate News.
- Mastrantonio, M., Bai, E., Uccelli, R., Cordiano, V., Screpanti, A., & Crosignani, P. (2018). Drinking water

- contamination from perfluoroalkyl substances (PFAS): An ecological mortality study in the Veneto Region, Italy. *European Journal of Public Health*, 28(1),180–185.<https://doi.org/10.1093/eurpub/ckx066>
- Panieri, E., Baralic, K., Djukic-Cosic, D., Djordjevic, A. B., & Saso, L. (2022). PFAS Molecules: A Major Concern for the Human Health and the Environment. *Toxics*, 10(2), 1–55. <https://doi.org/10.3390/toxics10020044>
- Podder, A., Sadmani, A. H. M. A., Reinhart, D., Chang, N. Bin, & Goel, R. (2021). Per and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) as a contaminant of emerging concern in surface water: A transboundary review of their occurrences and toxicity effects. *Journal of Hazardous Materials*, 419 (June), 126361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126361>
- Post, G. B., Cohn, P. D., & Cooper, K. R. (2012). Perfluorooctanoic acid (PFOA), an emerging drinking water contaminant: A critical review of recent literature. *Environmental Research*, 116, 93–117. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.03.007>
- Putri, S., & Ilyas, M. (2021). Diabetes Mellitus Among Workers Exposed to Perfluorooctanoic acid. *The Indonesian Journal of Community and Occupational Medicine*, 1(2), 107–113. <https://doi.org/10.53773/ijcom.v1i2.10.107-13>
- Rasouli, M., Jalili Ghazizade, M., Nasrabadi, T., & Baghdadi, M. (2025). Occurrence and transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the leachate of a municipal solid waste landfill in Tehran, Iran (a Middle-Eastern megacity). *Environmental Research*, 270(January), 120957.<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.120957>
- Rich, N. (2016). The Lawyer Who Became DuPont's Worst Nightmare. *The New York Times*, 1–23.
- Sadia, M., Nollen, I., Helmus, R., Ter Laak, T. L., Béen, F., Praetorius, A., & Van Wezel, A. P. (2023). Occurrence, Fate, and Related Health Risks of PFAS in Raw and Produced Drinking Water. *Environmental Science and Technology*, 57(8),3062–3074.<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06015>
- Sinclair, G. M., Long, S. M., & Jones, O. A. H. (2020). What are the effects of PFAS exposure at environmentally relevant concentrations? *Chemosphere*, 258, 127340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127340>
- Skogheim, T. S., Villanger, G. D., Weyde, K. V. F., Engel, S. M., Surén, P., Øie, M. G., Skogan, A. H., Biele, G., Zeiner, P., Øvergaard, K. R., Haug, L. S., Sabaredzovic, A., & Aase, H. (2020). Prenatal exposure to perfluoroalkyl substances and associations with symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder and cognitive functions in preschool children. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 223(1),80–92.<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.10.003>
- Sobhani, Z., Fang, C., Naidu, R., & Megharaj, M. (2021). Microplastics as a vector of toxic chemicals in soil: Enhanced uptake of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid by earthworms through sorption and reproductive toxicity. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101476. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101476>
- Spyrou, A., Vlastos, D., & Antonopoulou, M. (2024). Evidence on the genotoxic and ecotoxic effects of PFOA, PFOS and their mixture on human lymphocytes and bacteria. *Environmental Research*, 248(December 2023), 118298. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118298>
- Squadrone, S., Ciccotelli, V., Prearo, M., Favaro, L., Scanzio, T., Foglini, C., & Abete, M. C. (2015). Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and

- perfluorooctanoic acid (PFOA): emerging contaminants of increasing concern in fish from Lake Varese, Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4686-0>
- Steenland, K., Fletcher, T., & Savitz, D. A. (2010). Epidemiologic evidence on the health effects of perfluorooctanoic acid (PFOA). *Environmental Health Perspectives*, 118(8), 1100–1108. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901827>
- Teaf, C. M., Garber, M. M., Covert, D. J., & Tuovila, B. J. (2019). Perfluorooctanoic Acid (PFOA): Environmental Sources, Chemistry, Toxicology, and Potential Risks. *Soil and Sediment Contamination*, 28(3), 258–273. <https://doi.org/10.1080/15320383.2018.1562420>
- Wang, F., Shih, K. M., & Li, X. Y. (2015). The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics. *Chemosphere*, 119, 841–847. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.047>
- Wee, S. Y., & Aris, A. Z. (2023). Environmental impacts, exposure pathways, and health effects of PFOA and PFOS. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 267(July), 115663. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115663>
- Xiao, F., Simcik, M. F., Halbach, T. R., & Gulliver, J. S. (2015). Perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a U.S. metropolitan area: Migration and implications for human exposure. *Water Research*, 72, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.052>
- Xu, Z., Chen, Y., & Lyu, X. (2024). Particle size and co-presence of PFOA alter the transport of microplastics in saturated natural sediment. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 36(1).