

Artikel Review: Dampak Limbah Farmasi terhadap Lingkungan dan Upaya Pengelolaannya di Industri

Muhammad Rezky Wahyudi^{1*}, Hidayatur Rizky², Ufaul Apriani³, Nor Latifah⁴

¹⁻³Mahasiswa S1 Farmasi, Universitas Muhammadiyah Banjarmasin, Indonesia

⁴Dosen S1 Farmasi, Universitas Muhammadiyah Banjarmasin, Indonesia

Alamat: Jl. Gubernur Sarkawi, Handil Bakti, Kalimantan Selatan

Korespondensi penulis: rezky01234567@gmail.com*

Abstract. *The pharmaceutical industry produces solid, liquid, and gaseous waste containing active pharmaceutical ingredients that pose serious environmental risks. These wastes can disrupt ecosystems and accelerate antimicrobial resistance. This systematic literature review examines pharmaceutical waste concepts, classifications, characteristics, and relevant regulatory frameworks. It also addresses ecotoxicological effects on aquatic and terrestrial ecosystems, antibiotic contamination and resistance, water and soil pollution, treatment technologies, industrial policies, and best practices. Findings show that conventional wastewater treatment is largely ineffective at removing pharmaceutical residues, resulting in their presence in surface water, soil, and even drinking water. Compounds such as β -blockers, cytostatics, antibiotics, and hormones harm aquatic life by impairing reproduction and causing mutations. Antibiotic-laden industrial waste contributes to the emergence of resistant bacteria. Recommended treatment methods include biothermal processes, advanced oxidation (e.g., UV/H₂O₂, ozonation), adsorption (activated carbon), coagulation-flocculation, and controlled incineration. Stronger enforcement of hazardous waste regulations (e.g., Government Regulation No. 101/2014, Ministry of Environment and Forestry Regulation No. 56/2015) and adherence to WHO (2025) guidelines are essential. In conclusion, multisectoral collaboration (One Health), improved waste treatment capacity, and adoption of best practices are crucial to preventing pharmaceutical pollution and promoting environmental sustainability.*

Keywords: *pharmaceutical waste, environment, waste management.*

Abstrak. Industri farmasi menghasilkan limbah padat, cair, dan gas yang kaya senyawa aktif obat. Limbah ini berpotensi menjadi kontaminan lingkungan, mengganggu fungsi ekosistem, dan memicu resistensi antimikroba. Penelitian ini merupakan tinjauan literatur sistematis yang mengulas konsep limbah farmasi, karakteristik dan klasifikasinya, serta kerangka regulasi terkait. Diuraikan pula dampak ekotoksikologi obat di akuatik dan daratan, penyebaran antibiotik dan resistensi, pencemaran air dan tanah, teknologi pengolahan limbah terkini, kebijakan industri, dan praktik terbaik nasional/internasional. Hasil ulasan menunjukkan bahwa fasilitas pengolah air limbah konvensional tidak efektif menghilangkan residu obat, sehingga senyawa farmasi terdeteksi di perairan permukaan, tanah, dan bahkan air minum. Obat kelompok β -blockers, sitostatika, antibiotik, dan hormon dapat merusak organisme akuatik (misal menurunkan reproduksi, menimbulkan mutasi). Keberadaan antibiotik dalam limbah industri mempercepat munculnya bakteri resisten. Teknologi pengolahan yang direkomendasikan mencakup proses biologi-termadis, oksidasi lanjutan (misal UV/H₂O₂, ozon), adsorpsi (karbon aktif), koagulasi-flokulasi, dan insinerasi dengan kontrol polusi. Kebijakan pengelolaan limbah farmasi harus memperkuat penerapan regulasi B3 (misal PP No. 101/2014, Permen LHK No. 56/2015) serta pedoman WHO (2025) untuk perangkat kesehatan. Sebagai kesimpulan, perlu kolaborasi multi-sektor (one health), peningkatan kapasitas pengolahan limbah farmasi, dan penerapan praktik terbaik untuk mencegah pencemaran obat dan menjaga keberlanjutan lingkungan.

Kata kunci: limbah farmasi, lingkungan, pengelolaan limbah.

1. LATAR BELAKANG

Konsumsi obat-obatan di dunia terus meningkat seiring populasi menua dan kasus penyakit kronis bertambah (Kusturica et al., 2022). Akibatnya, produksi dan pembuangan obat turut meningkat. Obat-obatan dirancang untuk stabil dan berinteraksi dengan organisme hidup, sehingga senyawa aktifnya bersifat persisten dan sulit terdegradasi (OECD, 2019). Ada dua cara utama zat farmasi masuk ke lingkungan yakni ekskresi dan pembuangan yang tidak tepat (OECD, 2022). Pada saat yang sama, instalasi pengolahan air limbah (IPAL) konvensional umumnya tidak dirancang sepenuhnya untuk menghilangkan polutan farmasi (OECD, 2019). Dengan demikian, residu obat terdeteksi di berbagai lingkungan mulai dari perairan permukaan, air tanah, tanah, hingga air minum (Kusturica et al., 2022). Manusia kemudian terpapar zat farmasi melalui air minum, dan konsumsi residunya dalam tanaman pangan, ikan, produk susu, dan daging. Konsekuensi zat farmasi di lingkungan perairan merupakan masalah yang semakin memprihatinkan, dengan dampak yang dapat berkisar dari perubahan molekuler hingga efek pada tingkat populasi (Queirós et al., 2021). Keberadaan obat dalam lingkungan dianggap sebagai kontaminan emergen; UNESCO memasukkannya dalam target SDGs 2030 terkait kualitas air (UNESCO, 2020). Masih sedikit kajian komprehensif tentang dampak limbah farmasi industri di Indonesia. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengeksplorasi jejak pencemaran farmasi dan mitigasinya, khususnya di kawasan padat industri kimia-farmasi seperti Nusantara. Artikel ini menyajikan tinjauan teoritis dan literatur terkini (terutama 5 tahun terakhir) mengenai limbah farmasi mulai definisi dan klasifikasi, regulasi terkait, hingga dampak ekotoksikologi, resistensi, teknologi pengolahan, kebijakan, serta praktik terbaik nasional dan internasional. Diharapkan artikel review ini menjadi sumber acuan untuk pengelolaan limbah farmasi yang berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep dan Definisi Limbah Farmasi

Limbah farmasi merujuk pada sisa obat-obatan dan bahan kimia farmasi yang tidak terpakai atau terbuang selama produksi, distribusi, dan penggunaan obat. Berdasarkan Peraturan Menteri LH&K Nomor P.56/2015, limbah farmasi meliputi “obat buangan yaitu limbah obat kadaluarsa, terkontaminasi, dan buangan”. Dengan kata lain, limbah farmasi mencakup tablet/cairan obat kadaluarsa, produk rusak, serta kemasan sisa. Limbah ini bisa bersifat padat (sisa produk, kemasan), cair (limbah bilasan proses, larutan sisa), maupun gas (emisi pelarut) dalam industri farmasi. Jika limbah tersebut mengandung senyawa beracun (misalnya sitotoksik atau bahan kimia berbahaya), maka dikategorikan sebagai limbah B3 dan

wajib dikelola sesuai regulasi B3 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2015). Limbah farmasi berbeda dengan limbah medis rumah sakit karena diproduksi dalam skala besar oleh industri, sehingga karakter kontaminannya biasanya lebih pekat dan variatif.

Karakteristik dan Klasifikasi

Senyawa aktif obat memiliki keragaman kimia yang tinggi. Banyak obat dirancang untuk tahan lama agar mencapai target di tubuh, sehingga dalam lingkungan alamiahnya mereka terbilang persisten dan sulit terdegradasi. Misalnya, kelompok β -blockers dan hormon steroid bersifat larut dalam air dan stabil, sehingga mudah terakumulasi. Selain itu, obat tertentu bekerja pada dosis rendah tetapi memiliki efek biologis kuat; oleh sebab itu, bahkan jejak (nanogram per liter) sudah cukup untuk menimbulkan dampak toksik pada organisme akuatik (Kusturica et al., 2022). Berdasarkan sifat fisiknya, limbah farmasi dapat diklasifikasikan sebagai limbah padat (tablet, sisa kemasan, granul), limbah cair (larutan sisa proses, reagen bekas), dan limbah gas (uap pelarut). Yuspa dkk. (2024) mencontohkan teknologi pengelolaan: limbah padat dapat ditangani dengan inertisasi, insinerasi, atau penguburan khusus; limbah cair diolah dengan desinfeksi kimia dan IPAL konvensional (termasuk unit biologi); sedangkan gas buang diolah dengan filter atau sistem pemurnian udara. Peraturan pemerintah mengharuskan pemisahan limbah farmasi sejak sumbernya dan penyimpanan dalam wadah khusus bercap B3. Sebagai contoh, Permenteri LH&K No.56/2015 mengatur bahwa obat kadaluarsa dalam jumlah besar harus dikembalikan ke pemasok atau pengolah limbah berizin untuk dimusnahkan.

Regulasi dan Kebijakan Lingkungan Terkait

Secara internasional, WHO telah menerbitkan pedoman pengelolaan limbah farmasi di fasilitas kesehatan (2025) untuk menjamin pembuangan yang aman. Di Amerika Serikat, EPA mengatur pencemaran obat melalui regulasi penggunaan kembali (take-back) dan pengelolaan limbah farmasi rumah sakit. Uni Eropa memasukkan obat-obatan dalam daftar pengamatan kualitas air (Watch List WFD) untuk pemantauan ekotoksitas. Di Indonesia, peraturan terkait pengelolaan limbah B3 meliputi PP 101/2014 (umum), Permen LH&K No.56/2015 (khusus fasilitas kesehatan), serta Permenkes/RI yang mengatur penanganan limbah medis. Meskipun belum spesifik mengatur industri farmasi, persyaratan teknik pengelolaan limbah B3 (pengumpulan, penyimpanan, transportasi, pemusnahan) dalam regulasi tersebut wajib dipatuhi oleh pabrik obat. Sejalan itu, pedoman WHO (2025) menekankan bahwa limbah farmasi (termasuk obat tidak terpakai, produk rusak, pil/lepas) dari rumah sakit dan klinik harus ditangani melalui metode yang aman dan teruji (WHO, 2025).

Teori Lingkungan Terkait

Konsep “One Health” dan ekotoksikologi menjadi kerangka relevan untuk limbah farmasi. Obat sebagai bahan kimia antropogenik berperilaku sebagai kontaminan baru yang lintas batas ekosistem. Daughton (2014) dan Asfaw (2018) menekankan bahwa tekanan lingkungan yang terus-menerus dari senyawa farmasi memerlukan pendekatan terpadu. Beberapa teori terkait termasuk akumulasi bio (bioakumulasi) dan efek berantai makanan: senyawa farmasi yang larut dalam air dapat terakumulasi pada organisme air tawar/marinus dan berpindah ke konsumen higher tropic. Sebagai contoh, hormon estrogens menyebabkan perubahan fisiologis pada ikan (skrupter, kelamin kacau), dan β -blokernya dapat mematikan alga hijau pada konsentrasi rendah. Selain itu, sebagian obat dirancang untuk mengganggu sistem biologi (misal antikanker, antivirus), sehingga bila terserap organisme non-target dapat mengganggu siklus reproduksi atau menyebabkan mutasi genetik. UNESCO mencatat obat-obatan sebagai “kontaminan emergen” dalam pencapaian SDGs air bersih karena pengaruhnya pada kesehatan ekosistem dan manusia (Kusturica et al., 2022).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan pustaka sistematis. Data dikumpulkan dari basis data ilmiah (misalnya Scopus, Google Scholar, ResearchGate, Publish or Perish, dan Crossref) dengan kata kunci “limbah farmasi”, “pharmaceutical waste”, “environmental impact pharmaceutical”, “effluens farmasi”, dan sejenisnya. Kriteria inklusi mencakup artikel jurnal terakreditasi, prosiding, dan pedoman terbaru (≥ 2020) berbahasa Indonesia maupun Inggris yang membahas limbah farmasi dan pengaruh lingkungannya. Setiap literatur dievaluasi untuk relevansi topik: definisi limbah farmasi, regulasi, efek ekotoksikologi, antibiotik-resistensi, pencemaran, teknologi pengolahan, dan kebijakan pengelolaan. Sintesis data dilakukan secara deskriptif untuk membentuk narasi kohesif dalam setiap bagian pembahasan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian Dampak Ekotoksikologi

Konsentrasi obat-obatan yang ditemukan di lingkungan berada di bawah tingkat terapeutik. Di permukaan air yang menerima air limbah yang diolah, obat-obatan terdeteksi dalam konsentrasi kurang dari 100 ng/L (Vumazonke et al., 2020; Björklund dan Svahn, 2021; Li et al., 2021). Konsentrasi rendah ini adalah alasan untuk penilaian yang sulit tentang efek toksiknya pada ekosistem dan kesehatan manusia. Sebagian besar obat-obatan belum dieksplorasi secara memadai untuk efek toksik jangka panjang, keberadaan dan nasibnya di

lingkungan (Aus der Beek et al., 2016). Namun, senyawa aktif obat dapat bersifat toksik bagi organisme ekosistem air dan tanah. Misalnya, obat-obatan kelompok β -blockers, antibiotik, sitostatika, antidepresan, dan disruptor endokrin telah terbukti memengaruhi metabolisme, fisiologi, dan reproduksi organisme air (Nie et al., 2013; Kovács et al., 2015; Godlewska et al., 2021; Ortuzar et al., 2022). Kusturica dkk. (2022) melaporkan bahwa paparan β -blockers pada ikan dan alga mengakibatkan peningkatan angka kematian dan penurunan fungsi reproduksi pada dosis rendah. Sebagai contoh, penelitian Koagouw et al. (2021) yang pertama kali melaporkan paparan parasetamol (acetaminophen) di Teluk Jakarta menemukan bahwa konsentrasi tinggi parasetamol (610 ng/L di muara Angke dan 420 ng/L di Ancol) dapat menimbulkan risiko toksik bagi hewan laut seperti kerang. Sementara itu, obat antikanker (sitostatika) yang terlepas dari proses produksi dapat merusak DNA dan menghentikan pembelahan sel makhluk hidup bahkan pada jejak kecil, berpotensi menyebabkan mutasi genetik dan infertilitas pada populasi akuatik (Kusturica et al., 2022). Dengan demikian, keberadaan residu farmasi di badan air tidak hanya menurunkan kualitas ekosistem secara langsung, tetapi juga berisiko akumulasi jangka panjang melalui rantai makanan dan konsumsi manusia (misalnya melalui daging ikan atau sayuran irigasi) (Kusturica et al., 2022)

Resistensi Antimikroba

Limbah farmasi yang mengandung antibiotik merupakan sumber resistensi bakteri (antimicrobial resistance/AMR) di lingkungan. Efluen pabrik farmasi sering mengandung sisa antibiotik dan gen resistensi yang tersuspensi. Rayan (2023) menegaskan bahwa “limbah cair farmasi yang sarat dengan antibiotik dan gen resistensi memberi risiko lingkungan signifikan karena pengolahan yang tidak memadai”. Artinya, pembuangan antibiotik ke sistem perairan tanpa penanganan sesuai dapat menimbulkan tekanan seleksi tinggi, sehingga bakteri resisten mudah muncul dan menyebar. Ajekiigbe dkk. (2025) juga mencatat bahwa sumber utama polusi antibiotik meliputi limbah pabrik farmasi, efluen fasilitas kesehatan, limpasan peternakan, dan pembuangan obat yang sembarangan. Keduanya menekankan pentingnya pendekatan One Health: intervensi bersama sektor kesehatan, pertanian, dan lingkungan untuk mengatasi AMR. Di bidang kebijakan, belum terdapat standar global konsisten untuk residu antibiotik dalam efluen industri, sehingga Rayan dkk. mendesak pembentukan pedoman internasional tentang batas residu antibiotik dan cara pengujiannya. Tanpa langkah tersebut, risiko bakteri “superbugs” dari limbah industri farmasi akan terus meningkat.

Pencemaran Air dan Tanah

Limbah farmasi industri adalah salah satu sumber pencemar mikro di lingkungan. Residu obat dilepaskan ke saluran air melalui efluen pabrik atau pembuangan domestik. Studi Koagouw et al. (2021) menunjukkan bahwa zat aktif obat dapat mencapai perairan laut pantai; parasetamol terdeteksi dengan konsentrasi tinggi di muara sungai Jakarta. Lebih luas, hasil survei menunjukkan adanya antibiotik dalam sumber air minum beserta bakteri resisten di sekitarnya yang mengindikasikan obat kadaluarsa turut mencemari sistem air. Limbah farmasi juga berdampak pada tanah, terutama melalui penggunaan lumpur limbah (biosolid) dan pupuk limbah. Tóth dkk. (2023) menyoroti bahwa lumpur aktif hasil WWTP (yang juga menerima limbah farmasi) mengandung banyak residu obat; jika dipakai sebagai pupuk, senyawa farmasi terlarut dapat memasuki tanah dan air tanah (Gworek, Kijeńska, Wrzosek, et al., 2021). Selain itu, kotoran ternak yang diberikan antibiotik turut mengkontaminasi lahan pertanian. Oleh karena itu, pengelolaan limbah cair industri farmasi perlu mempertimbangkan daur ulang air (zero liquid discharge) atau pengobatan yang memastikan zat berbahaya tidak tersisa (Tóth et al., 2023). Tanpa langkah pengendalian, senyawa obat berbahaya dapat menurunkan kualitas tanah, mengganggu mikroba tanah, serta mengancam kesehatan manusia melalui kontak tanah atau konsumsi tanaman terkontaminasi.

Teknologi Pengolahan Limbah Farmasi

Berbagai teknologi khusus diperlukan untuk mengolah limbah farmasi agar aman dilepas ke lingkungan. Untuk limbah padat (tablet kadaluarsa, kemasan obat), metode yang umum diterapkan meliputi insinerasi dengan suhu tinggi (menguraikan senyawa organik menjadi $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, asam, natrium klorida, dll.), inertisasi/enkapsulasi (pencampuran dengan semen atau karbon untuk mengurung toksin), dan sanitary landfill khusus (diisi lapisan tanah, kapur, hingga senyawa tidak bocor) (Yuspa et al., 2024). Sementara untuk limbah cair farmasi, pendekatan biologis dan kimia sangat penting. Unit IPAL biologis (aktivitas sludge, UASB) dapat menurunkan BOD/COD, namun umumnya belum cukup menghilangkan molekul obat persisten (Adeoye et al., 2024). Karenanya, teknologi advanced oxidation processes (AOP) seperti reaksi Fenton ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$), fotolisis UV, atau ozonasi sering digunakan untuk memecah senyawa farmakologi secara radikal (Tóth et al., 2023). Adsorpsi menggunakan karbon aktif atau resin juga efektif menyerap residu farmasi tersisa. Kombinasi fisiko-kimia seperti koagulasi-flokulasi, ultrafiltrasi, dan membran osmosis balik dapat meningkatkan efisiensi. Tóth dkk. (2023) menekankan bahwa metode fisiko-kimia memungkinkan pemulihan bahan berharga sekaligus mendukung ekonomi sirkular (misalnya daur ulang pelarut). Yuspa dkk. (2024) menyebutkan bahwa proses hibrid (gabungan biologis dan fisiko-kimia) biasanya

diperlukan untuk mencapai target nol buangan cair (zero liquid discharge) di industri farmasi. Secara keseluruhan, investasi pada teknologi pengolahan mutakhir (termasuk daur ulang air, katalis, nanoteknologi) sangat krusial untuk mengurangi beban limbah farmasi terhadap lingkungan.

Kebijakan dan Praktik Terbaik

Kebijakan industri dan tata kelola menjadi aspek penting pencegahan dampak limbah farmasi. Secara global, beberapa negara telah memberlakukan pengelolaan farmasi yang ketat. Misalnya, Amerika Serikat mengatur zat farmasi yang berbahaya dalam limbah rumah sakit melalui Pharmaceuticals Rule EPA (2019), dan program take-back obat bebas untuk mencegah pembuangan sembarangan. Di Uni Eropa, Direktif Air membatasi senyawa endokrin pengganggu dalam efluen air. Di Indonesia, peraturan B3 mewajibkan perusahaan untuk memilah, menyimpan, dan memusnahkan limbah berbahaya sesuai standar. Praktek terbaik meliputi implementasi manajemen EHS (Environment, Health, Safety) terintegrasi, audit lingkungan rutin, serta pelatihan karyawan. Sebagai contoh, perusahaan farmasi mengembangkan prosedur penanganan limbah B3 yang rinci, menggunakan wadah khusus berlabel B3, dan melibatkan pihak berizin dalam pemusnahan. Pendekatan proaktif lain adalah adopsi konsep green chemistry: industri didorong merancang obat yang lebih ramah lingkungan (biodegradable) dan mengoptimalkan dosis agar limbah aktif minimal (Kusturica et al., 2022). Lebih lanjut, literatur WHO (2025) menyarankan fasilitas kesehatan (dan seharusnya juga pabrik obat) menyediakan tempat pengembalian sisa obat dan memastikan pemusnahan sesuai protokol.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Limbah farmasi industri terbukti menjadi sumber polusi lingkungan yang kompleks. Senyawa obat yang stabil dan toksik dapat menurunkan kualitas ekosistem air dan tanah serta meningkatkan risiko kesehatan (termasuk penyebaran antibiotik-resisten). Pengolahan limbah yang belum optimal memungkinkannya terdeteksi di lingkungan pada konsentrasi rendah (ng/L) namun efeknya signifikan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, perlu upaya terpadu pada tingkatan berikut: (1) Regulasi yang lebih ketat – misalnya memperjelas batas kandungan limbah farmasi, mengenakan sanksi bagi pelanggar, dan menyelaraskan kebijakan antarinstansi; (2) Teknologi bersih – investasi IPAL khusus limbah farmasi, penggunaan proses oksidatif/biologis canggih, serta program daur ulang air secara massif; (3) Edukasi dan tanggung jawab produsen – penerapan prinsip extended producer responsibility, pelatihan pekerja, serta kesadaran publik tentang pembuangan obat yang benar; dan (4) Penelitian

lanjutan – monitoring ekosistem secara kontinyu dan studi dampak kesehatan. Secara keseluruhan, mitigasi dampak limbah farmasi menuntut kolaborasi ilmuwan, pemerintah, industri, dan masyarakat (pendekatan one health). Jika langkah-langkah ini diikuti, industri farmasi dapat beroperasi lebih hijau tanpa mengorbankan kualitas lingkungan atau kesehatan generasi mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Ibu Nor Latifah selaku dosen pengampu mata kuliah Farmasi Industri atas bimbingan dan dukungan yang diberikan. Terima kasih juga ditujukan kepada seluruh pihak yang turut berkontribusi, termasuk Universitas Muhammadiyah Banjarmasin atas penyediaan fasilitas serta suasana akademik yang mendukung terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR REFERENSI

- Adeoye, J. B., Tan, Y. H., Lau, S. Y., Tan, Y. Y., Chiong, T., Mubarak, N. M., & Khalid, M. (2024). Advanced oxidation and biological integrated processes for pharmaceutical wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 353, 120170.
- Ajekiigbe, V. O., Agbo, C. E., Ogieuhi, I. J., Anthony, C. S., Onuigbo, C. S., Falayi, T. A., ... & Bakare, I. S. (2025). The increasing burden of global environmental threats: Role of antibiotic pollution from pharmaceutical wastes in the rise of antibiotic resistance. *Discover Public Health*, 22(1), 1–10.
- Asfaw, A. (2018). Pharmaceutical waste and the environment. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable water and wastewater processing* (pp. 407–429). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813265-6.00014-2>
- Aus der Beek, T., Weber, F. A., Bergmann, A., Hickmann, S., Ebert, I., Hein, A., & Küster, A. (2016). Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(4), 823–835.
- Björklund, E., & Svahn, O. (2021). Total release of 21 indicator pharmaceuticals listed by the Swedish Medical Products Agency from wastewater treatment plants to surface water bodies in the 1.3 million populated County Skåne (Scania), Sweden. *Molecules*, 27, 77. <https://doi.org/10.3390/molecules27010077>
- Godlewska, K., Jakubus, A., Stepnowski, P., & Paszkiewicz, M. (2021). Impact of environmental factors on the sampling rate of β -blockers and sulfonamides from water by a carbon nanotube-passive sampler. *Journal of Environmental Sciences*, 101, 413–427. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.08.034>
- Gworek, B., Kijewska, M., Wrzosek, J., & Graniewska, M. (2021). Pharmaceuticals in the soil and plant environment: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(4), 145.

- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2015). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.56/Menlhk-Setjen/2015 tentang tata cara dan persyaratan teknis pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun dari fasilitas pelayanan kesehatan. Jakarta: Kementerian LHK.
- Koagouw, W., Arifin, Z., Olivier, G. W. J., & Ciocan, C. (2021). High concentrations of paracetamol in effluent dominated waters of Jakarta Bay, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112558. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112558>
- Kovács, R., Csenki, Z., Bakos, K., Urbányi, B., Horváth, Á., Garaj-Vrhovac, V., et al. (2015). Assessment of toxicity and genotoxicity of low doses of 5-fluorouracil in zebrafish (*Danio rerio*) two-generation study. *Water Research*, 77, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.025>
- Kusturica, M. P., Jevtic, M., & Trifunovic Ristovski, J. (2022). Minimizing the environmental impact of unused pharmaceuticals: Review focused on prevention. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1077974. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1077974>
- Li, Z., Yu, X., Yu, F., & Huang, X. (2021). Occurrence, sources and fate of pharmaceuticals and personal care products and artificial sweeteners in groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 20903–20920. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12721-3>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2022). Management of pharmaceutical household waste: Limiting environmental impacts of unused or expired medicine. OECD Publishing.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). Pharmaceutical residues in freshwater: Hazards and policy responses (OECD Studies on Water). OECD Publishing.
- Ortúzar, M., Esterhuizen, M., Olicón-Hernández, D. R., González-López, J., & Aranda, E. (2022). Pharmaceutical pollution in aquatic environments: A concise review of environmental impacts and bioremediation systems. *Frontiers in Microbiology*, 13, 869332. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.869332>
- Queirós, V., Azeiteiro, U. M., Soares, A. M. V. M., & Freitas, R. (2021). The antineoplastic drugs cyclophosphamide and cisplatin in the aquatic environment – Review. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125028. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.125028>
- Rayan, R. A. (2023). Pharmaceutical effluent evokes superbugs in the environment: A call to action. *Biosafety and Health*, 5(6), 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.bsheal.2023.10.005>
- Tóth, A. J., Fózer, D., Mizsey, P., Varbanov, P. S., & Klemeš, J. J. (2022). Physicochemical methods for process wastewater treatment: Powerful tools for circular economy in the chemical industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 39(7), 1123–1151. <https://doi.org/10.1515/revce-2021-0094>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2020). Emerging pollutants in water and wastewater. <https://en.unesco.org/emergingpollutantsinwaterandwastewater>

- Vumazonke, S., Khamanga, S. M., & Ngqwala, N. P. (2020). Detection of pharmaceutical residues in surface waters of the Eastern Cape Province. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 4067. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114067>
- World Health Organization. (2025). Safe management of pharmaceutical waste from health care facilities: Global best practices. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Yuspa, S., Latifah, N., & Lestari, Y. P. I. (2024). Review of waste management of solid, liquid, and gaseous in the pharmaceutical industry. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, 3(12), 3379–3386. <https://doi.org/10.36514/jci.v3i12.3379>