

## Dinamika Resistensi Antimikroba dan Dampak Ekotoksikologi Limbah Cair Rumah Sakit terhadap Ekosistem

Kartini Amelia Putri<sup>1</sup>; Mirryazil Jannah<sup>2</sup>; Nadisa Azzahra<sup>3</sup>; Firdus<sup>4</sup>;  
Muhammad Nasir<sup>5</sup>; Alia Rizki<sup>6</sup>

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala,  
Banda Aceh, Indonesia<sup>1,2,3,4,5,6</sup>

\*Email Korespondensi: [firdus.usk@gmail.com](mailto:firdus.usk@gmail.com)

### Sejarah Artikel:

Diterima 02-05-2026  
Disetujui 08-05-2026  
Diterbitkan 10-05-2026

### ABSTRACT

*Antimicrobial resistance and environmental pollution from hospital wastewater are global problems that threaten human health and ecosystems. Wastewater from healthcare facilities contains pathogenic microorganisms, antibiotic residues, resistance genes, as well as chemical pollutants that cannot be completely removed by conventional waste treatment systems. The research method was conducted based on a literature review, including experimental approaches, field surveys, and literature studies. The results of the study indicate that the presence of biofilms in drainage channels serves as a major reservoir for multi-drug resistant (MDR) bacteria and facilitates horizontal transfer of resistance genes, accelerating the emergence of increasingly resistant microbial strains. Non-antibiotic pollutants such as analgesic drugs and caffeine also affect the composition of the wastewater microbiome and increase the risk of pathogen growth and resistance. The toxicological impacts of this pollution can cause oxidative stress and tissue damage in aquatic organisms, as well as serious problems in the food chain cycle. Conventional waste treatment often cannot filter all residues and resistance genes, thus requiring the application of more advanced treatment technologies such as advanced oxidation and the use of nanomaterials. To reduce this risk, hospital waste management must be conducted systematically and scientifically, including controlling the rational use of antibiotics and improving the effectiveness of wastewater treatment systems. This approach is important to protect public health, maintain the sustainability of aquatic ecosystems, and prevent the widespread spread of antibiotic resistance.*

**Keywords:** Antimicrobial resistance; hospital wastewater; environmental toxicology

### ABSTRAK

Resistensi antimikroba dan pencemaran lingkungan oleh limbah cair rumah sakit merupakan permasalahan global yang mengancam kesehatan manusia dan ekosistem. Limbah cair dari fasilitas kesehatan mengandung mikroorganisme patogen, residu antibiotik, gen resistansi, serta polutan kimiawi yang tidak sepenuhnya dapat di hilangkan oleh sistem pengolahan limbah konvensional. Metode penelitian dilakukan berdasarkan literature review meliputi pendekatan eksperimental, survei lapangan, serta studi literatur. Hasil penelitian menunjukkan keberadaan biofilm dalam saluran pembuangan berfungsi sebagai reservoir utama bagi bakteri *multi-drug resistant* (MDR) dan memfasilitasi transfer horizontal gen resistansi yang mempercepat munculnya strain mikroba yang semakin resisten. Polutan non-antibiotik seperti obat analgesik dan kafein turut mempengaruhi komposisi mikrobioma air limbah serta meningkatkan risiko pertumbuhan patogen dan resistensi. Dampak toksikologis dari pencemaran ini dapat menyebabkan stres oksidatif dan kerusakan jaringan pada organisme akuatik, serta

permasalahan serius pada siklus rantai makanan. Pengolahan limbah konvensional sering tidak mampu menyaring semua residu dan gen resistansi, sehingga memerlukan penerapan teknologi pengolahan yang lebih canggih seperti oksidasi lanjutan dan penggunaan nanomaterial. Untuk mengurangi risiko ini, pengelolaan limbah rumah sakit harus dilakukan secara sistematis dan berbasis ilmiah, termasuk pengendalian penggunaan antibiotik secara rasional serta peningkatan efektivitas sistem pengolahan air limbah. Pendekatan ini penting untuk melindungi kesehatan masyarakat, menjaga keberlanjutan ekosistem perairan, dan mencegah penyebaran resistensi antibiotik yang semakin meluas.

**Katakunci:** Resistensi Antimikroba, Limbah Rumah Sakit, Dampak Toksikologis

**Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:**

Putri, K. A. ., Jannah, M., Azzahra , N., Firdus, F., Nasir, M., & Rizki, A. (2026). Dinamika Resistensi Antimikroba dan Dampak Ekotoksikologi Limbah Cair Rumah Sakit terhadap Ekosistem. *Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(3), 4251-4263. <https://doi.org/10.63822/rn974z97>

## PENDAHULUAN

Resistensi antibiotik timbul karena peningkatan konsumsi yang tidak rasional, yang berpotensi menyebabkan kegagalan pengobatan, peningkatan masa penyakit, morbiditas, dan mortalitas. Kurangnya koordinasi dan pemahaman di kalangan tenaga medis dan masyarakat memperburuk masalah resistensi dan penyalahgunaan antibiotik di Indonesia. Residu antibiotik yang dilepaskan ke lingkungan melalui limbah mengancam ekosistem akuatik dan kesehatan masyarakat, sehingga perlu adanya studi risiko ekotoksikologi (Chen *et al.*, 2025).

Limbah cair yang dihasilkan dari aktivitas medis mengandung berbagai macam mikroorganisme patogen yang telah terpapar tekanan selektif antibiotik. Kondisi ini menciptakan lingkungan yang ideal bagi bakteri untuk mengembangkan mekanisme pertahanan diri. Rumah sakit, khususnya tipe C di Malang, menunjukkan bahwa saluran pembuangan air menjadi jalur transmisi utama bagi bakteri seperti *Enterobacter sp* untuk masuk ke ekosistem yang lebih luas. Hal ini diperkuat oleh temuan bahwa bakteri yang dilepaskan ke lingkungan bukan lagi bakteri biasa, melainkan bakteri yang telah membawa materi genetik resistensi yang kompleks (Wasistha *et al.*, 2024).

Dalam perspektif yang lebih luas, Zafar *et al.* (2026) memberikan gambaran bahwa limbah rumah sakit tidak hanya membawa polutan biologis, tetapi juga polutan kimiawi yang mencakup spektrum luas, mulai dari zat organik, anorganik, hingga residu radioaktif. Pencemaran air yang berasal dari fasilitas kesehatan ini berkontribusi secara signifikan terhadap kerusakan ekosistem global. Kehadiran kontaminan ini mengubah karakteristik fisik dan kimia perairan, yang pada gilirannya memengaruhi struktur komunitas mikrobioma alami. Integrasi antara polutan kimia dan biologis ini menciptakan "bom waktu" bagi kesehatan masyarakat, di mana lingkungan air yang tercemar menjadi reservoir permanen bagi gen resistensi antibiotik (ARGs) yang dapat berpindah ke bakteri non-patogen di alam (Aleem *et al.*, 2021).

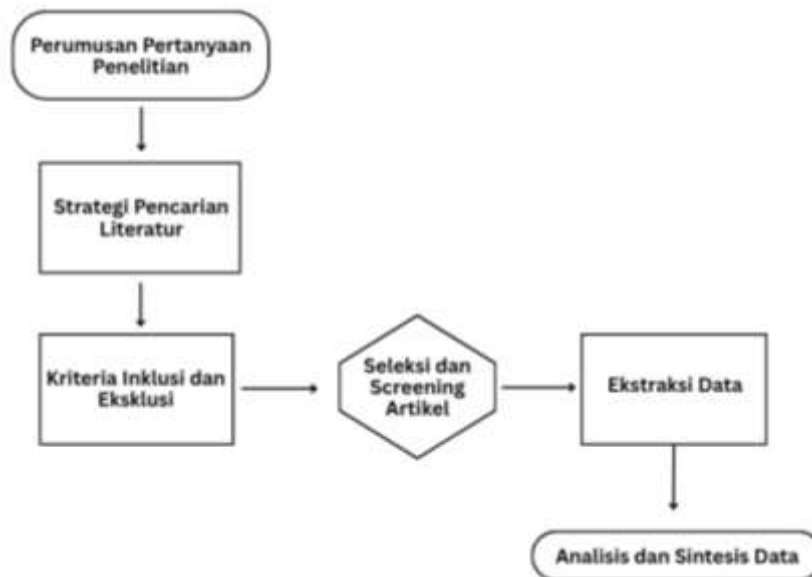
Antibiotik biasanya diresepkan untuk menangani infeksi bakteri pada kesehatan manusia dan hewan. Antibiotik sering masuk ke lingkungan melalui ekskresi oleh manusia dan pembuangan sebagai limbah oleh pabrik farmasi. Sebagian besar antibiotik tidak dimetabolisme setelah dikonsumsi melalui reaksi seperti hidrosilasi, pemecahan, atau glukuronasi (Brown, *et al.*, 2006). Sebaliknya, sejumlah signifikan antibiotik dikeluarkan ke lingkungan melalui urin dan feses, yang bercampur dengan air. Alasan tingginya resistensi terhadap antibiotik mungkin merupakan kombinasi dari beberapa penyebab seperti penggunaan antibiotik yang tidak perlu pada jenis penyakit apapun, termasuk infeksi virus, dan adalah pembelian antibiotik secara luas tanpa resep dokter.

Keberadaan antibiotik di berbagai ceruk lingkungan seperti limbah kota, instalasi pengolahan air limbah, air permukaan dan sungai, air tanah, air minum, lumpur, pupuk kandang, tanah pertanian, perairan pesisir dan sedimen, telah dilaporkan sebelumnya oleh beberapa peneliti. Antibiotik yang tersedia dalam air limbah kota berpotensi mencemari air permukaan dan air tanah yang menerima (Xia *et al.*, 2016). Resistensi antimikroba adalah masalah serius dan berkembang di negara maju maupun negara berkembang di seluruh dunia. Oleh karena itu, studi ini dirancang dengan tujuan untuk mengevaluasi kejadian bakteri resisten antibiotik dalam limbah rumah sakit dan lingkungan yang menerimanya.

## METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian adalah review dari berbagai jurnal yang diperoleh melalui database seperti SINTA, Elsevier, dan Google Scholar menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terkait pencemaran

lingkungan, mikroorganisme, dan dampaknya terhadap kesehatan ekosistem serta manusia. Metode ini dilakukan secara sistematis, transparan, dan dapat direplikasi. Berikut adalah flowchart dan sistematika dari review:



## HASIL DAN PEMBAHASAN

**Tabel 1. Hasil Tinjauan Sistematis**

Autor/ Tahun	Judul	Metode	Hasil
Sri Agung Fitri Kusuma, Tina Rostinawati, Rini Hendriani, Muhammad Faisal Budiman, Ida Parwati (2021)	Pengaruh jenis tempat penampungan air terhadap prevalensi dan profil resistensi antibiotik <i>Pseudomonas aeruginosa</i> yang diisolasi dari air kamar mandi di rumah sakit	Penelitian dilakukan dengan mengambil 25 sampel air dari kamar mandi di lima rumah sakit di Bandung yang menggunakan dua jenis tempat penampungan air yaitu bak mandi permanen dan ember (pails). Sampel diuji keberadaan <i>P. aeruginosa</i> dengan kultur pada media MacConkey, dilanjutkan identifikasi fenotip dan uji biokimia. Isolat diuji resistensi terhadap antibiotik ceftazidime, piperacillin/tazobactam, ciprofloxacin, meropenem, dan gentamicin menggunakan metode difusi agar dengan cakram antibiotik	Penelitian menunjukkan bahwa rumah sakit dengan bak mandi permanen memiliki jumlah koloni <i>Pseudomonas aeruginosa</i> lebih tinggi dan isolatnya menunjukkan resistensi antibiotik hingga 14,54%. Isolat dari rumah sakit tersebut terutama resisten terhadap ceftazidime, ciprofloxacin, piperacillin/tazobactam, dan gentamicin dengan indeks resistensi antibiotik berganda 0,4–0,6. Hal ini menandakan bahwa bak mandi permanen berpotensi menjadi reservoir bakteri <i>P. aeruginosa</i> resisten di kamar mandi rumah sakit.
Achmad Gus Fahmi, Zaenal Abidin, Cecep	Antibiotic consumption and antibiotics	Penelitian retrospektif observasional menggunakan data rekam medis pasien rawat	Total penggunaan antibiotik mencapai 20.504,42 kg/tahun dengan 27 jenis antibiotik.

Kusmana, Erliza Noor (2024)	occurrence into the environment: a case study of hospital in Metro, Lampung	inap pada tahun 2020 di sebuah rumah sakit di Kota Metro, Lampung. Analisis pola penggunaan antibiotik dilakukan dengan metode DU90% untuk mengidentifikasi antibiotik paling banyak digunakan. Perhitungan konsumsi antibiotik dan residu yang terbuang ke lingkungan dilakukan berdasarkan dosis, jumlah tablet, serta tingkat ekskresi antibiotik. Risiko ekotoksikologi diperkirakan dengan rasio konsentrasi lingkungan.	Empat jenis antibiotik utama yang banyak digunakan adalah ceftriaxone, cefixime, cefadroxil, dan levofloxacin. Nilai risiko ekotoksikologi (RQs) untuk organisme air lebih besar dari 1 (RQs>1), menandakan ada risiko kerusakan ekosistem akibat residu antibiotik dari limbah rumah sakit yang masuk ke badan air. Penelitian menunjukkan adanya potensi pencemaran lingkungan dan kerusakan ekosistem akuatik terkait pelepasan residu antibiotik dari fasilitas kesehatan.
Giyantolin, Yuli Subiakto, Timbul P. H. Simorangkir, Widyati (2025)	Hospital Wastewater Pharmaceutical Residues and Their Impact on Community Microbial Resistance: An Epidemiological and Pharmaceutical Systematic Review	Systematic review (PRISMA 2020), analisis 21 artikel dari database (2015–2025) dengan sintesis naratif.	Limbah rumah sakit mengandung banyak residu antibiotik dan gen resistensi (ARGs); pengolahan limbah belum efektif ( $\pm 16-50\%$ ), sehingga berkontribusi besar terhadap peningkatan resistensi mikroba di lingkungan dan masyarakat.
Gabriel Andari Kristanto & William Koven (2019)	reliminary Study of Antibiotic Resistant <i>Escherichia coli</i> in Hospital Wastewater Treatment Plants in Indonesia	Eksperimen laboratorium pada sampel limbah rumah sakit (WWTP); uji resistensi <i>E. coli</i> dengan metode Kirby-Bauer.	Pengolahan limbah justru meningkatkan persentase <i>E. coli</i> resisten antibiotik (terutama ciprofloxacin & cefixime); resistensi terhadap meropenem juga mulai muncul.
Marcel Suleiman, Gaofei Jiang, Alexandre Jousset (2026)	Pharmaceuticals residues lead to enrichment of Human, Animal, and Plant Pathogens in Wastewater	Eksperimen laboratorium dengan analisis 16S rRNA (metabarcoding) pada limbah yang diberi berbagai obat (caffeine, ibuprofen).	Residu obat meningkatkan jumlah dan keanekaragaman patogen (manusia, hewan, tumbuhan) dalam limbah, sehingga meningkatkan risiko kesehatan lingkungan.
Ian Kurniawan, Pra Dian Mariadi, dan Adri Huda (2019)	Hubungan Tingkat Penggunaan Antibiotik di Rumah Sakit dengan Potensi Cemaran Antibiotik di Perairan Umum	Analisis komparasi yang mengkorelasikan data sekunder (laporan penggunaan antibiotik di RS) dengan data primer (analisis laboratorium air limbah menggunakan <i>High Resolution Mass Spectrometry</i> LC/Q-TOF/MS).	Ditemukan potensi cemaran 5 jenis antibiotik dalam air limbah rumah sakit, yaitu Ciprofloxacin, Lincomycin, Metronidazole, Netilmicin, dan Ofloxacin/Levofloxacin, dengan konsentrasi tertinggi pada Ciprofloxacin.
M.H. Aminudin, Farah Amalina, M.R. Ab Hamidd,	Environmental and public health risks of antibiotic resistance	Menggunakan tinjauan pustaka (literatur) yang komprehensif dengan mengintegrasikan studi	Penggunaan antibiotik yang berlebihan dalam peternakan unggas menyebabkan

<p>S. Sulaiman, Nor Azfa, dan Abdul Syukor Abd Razak (2026)</p>	<p>gene pollution in poultry systems: Sustainability impact, transmission pathways, and mitigation strategies.</p>	<p>kasus, data pemantauan gen resistensi antibiotik (ARG) global, dan evaluasi teknologi pengolahan limbah.</p>	<p>kontaminasi gen resistensi antibiotik (ARG) yang luas pada lingkungan (tanah, air, dan udara). Pendekatan pengolahan limbah saat ini seperti pengomposan dan <i>anaerobic digestion</i> mampu mengurangi jumlah ARG, tetapi belum sepenuhnya cukup untuk menghilangkan penyebaran resistensi.</p> <p>Pengendalian polusi ARG memerlukan pendekatan multifaset, termasuk pengurangan penggunaan antibiotik melalui program kepatuhan, penggunaan alternatif (seperti probiotik dan vaksin), serta kebijakan yang terintegrasi untuk melindungi kesehatan masyarakat dan lingkungan.</p>
---	--	---	---

## Pembahasan

### a. Profil Bakteriologis dan Pola Resistensi Spesifik

Detail mengenai jenis bakteri yang mendominasi limbah rumah sakit diungkapkan secara spesifik dalam beberapa studi. Wasistha *et al.* (2024) melaporkan bahwa *Enterobacter sp* ditemukan secara konsisten pada titik sebelum dan sesudah Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Yang sangat mengkhawatirkan adalah profil resistensinya; bakteri ini menunjukkan tingkat resistensi terhadap Ampicillin sebesar 72% pada sampel post-IPAL. Meskipun masih menunjukkan sensitivitas terhadap Gentamicin, Meropenem, dan Ciprofloxacin, fakta bahwa bakteri ini tetap bertahan hidup setelah proses pengolahan menunjukkan bahwa sistem IPAL yang ada saat ini tidak sepenuhnya mampu mengeliminasi ancaman biologis tersebut. Konsentrasi bakteri yang ditemukan, yakni berkisar antara 3000 hingga 3500 CFU/100 mL, jelas melampaui baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah, yang menandakan adanya kegagalan sistemik dalam pengolahan limbah cair rumah sakit.

Pencemaran antibiotik juga terjadi di RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado. Menurut Kusuma *et al.* (2021), hasil identifikasi bakteri melalui uji morfologi, uji fisiologi bakteri dan uji biokimia dalam pada inlet limbah cair adalah bakteri *Bacillus spp.* dan *Streptococcus spp.* Sedangkan tiga spesies bakteri berbeda yang teridentifikasi dari outlet sistem pembuangan limbah cair yaitu *Escherichia spp.*, *Streptococcus spp.* dan *Staphylococcus spp.* Hasil uji sensitivitas antibiotik seluruh bakteri teridentifikasi kecuali *Bacillus spp.* yang tidak dapat ditentukan sensitivitasnya, menunjukkan interpretasi resisten terhadap clindamycin. Hasil tersebut menggambarkan adanya antibiotik yang terkandung pada sistem pembuangan limbah cair RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado.

Kurangnya pengolahan limbah secara sistematis sebelum pembuangan menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan yang nyata, mengingat sifat dan kandungan polutan yang dapat ditemukan dalam

limbah. Di Benin, setidaknya Konsentrasi residu antibiotik rata-rata berkisar antara 0,043 hingga 7,65 µg/l. Ciprofloxacin, metronidazole dan sulfamethoxazole memiliki konsentrasi residu tertinggi (Deguenon *et al.*, 2022). Oleh karena itu, perlindungan jaringan air dan limbah dari kontaminasi patogen dan gen resistensi antibiotik sangat penting untuk perlindungan kesehatan masyarakat. Terutama masyarakat yang berada di lingkungan rumah sakit.

#### **b. Dampak Biofilm dan Reservoir Tersembunyi pada Saluran Pembuangan**

Meningkatnya tingkat isolasi bakteri resisten dalam beberapa tahun terakhir memerlukan identifikasi reservoir infeksi potensial di fasilitas pelayanan kesehatan. Khususnya, jaringan air limbah klinis merupakan sumber potensial bakteri resisten antibiotik (Bakon *et al.*, 2023). Sistem air limbah klinis merupakan reservoir bagi bakteri multi-drug-resistant. Analisis mendalam mengenai reservoir bakteri resisten juga mencakup bagian-bagian teknis dari sistem drainase rumah sakit. Berdasarkan laporan mengenai sistem air limbah klinis, ditemukan bahwa sifon atau saluran pembuangan di bawah wastafel merupakan hotspot bagi bakteri *multi-drug resistant* (MDR). Bakteri seperti *P. aeruginosa* tipe ST823 dan *Enterobacter cloacae* tipe ST167 sering ditemukan menetap di dalam biofilm sifon, terutama pada unit-unit dengan risiko tinggi seperti hemato-onkologi (Sib *et al.*, 2019).

Penggunaan desain peralatan sanitasi yang tepat menjadi kunci dalam mitigasi risiko ini. Rekomendasi teknis yang muncul dari kajian ini adalah perlunya pembersihan dan pembilasan sifon secara harian, serta penggunaan teknologi sifon yang dapat membersihkan diri sendiri (*self-cleaning siphons*). Hal ini krusial karena bakteri yang hidup dalam biofilm di sifon memiliki resistensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan bakteri dalam bentuk planktonik. Perlindungan terhadap jaringan air dari kontaminasi gen resistensi antibiotik merupakan pilar utama dalam menjaga kesehatan masyarakat, mengingat jalur limbah ini memiliki koneksi langsung dengan sistem air permukaan yang mungkin digunakan kembali oleh masyarakat di sekitar area rumah sakit.

Secara toksikologi lingkungan, biofilm ini memfasilitasi transfer gen melalui konjugasi pada tingkat yang jauh lebih tinggi daripada dalam air bebas. Hal ini menyebabkan munculnya bakteri "superbug" yang tidak hanya resisten terhadap antibiotik, tetapi juga lebih toleran terhadap stres lingkungan. Ketika biofilm ini terkelupas dan terbawa efluen, mereka membawa jutaan bakteri yang sangat resisten langsung ke ekosistem air publik (Asfaw, 2018). Standar IPAL rumah sakit di banyak negara berkembang tidak dirancang untuk menangani polutan mikro seperti gen resistensi. Secara toksikologis, efluen RS dilepaskan ke lingkungan dengan beban ARG yang "tidak terlihat" karena parameter keberhasilan IPAL saat ini hanya mengukur bakteri Coliform total. Sehingga ARG harus diklasifikasikan sebagai polutan lingkungan yang berbahaya dan dapat ditekan bahwa limbah cair dari unit isolasi penyakit menular dan unit onkologi mengandung campuran obat yang sangat kuat yang memicu mutasi bakteri secara ekstrem di dalam pipa saluran limbah.

#### **c. Konsumsi Farmasi dan Beban Lingkungan di Kawasan Urban**

Hubungan antara aktivitas klinis dan beban lingkungan dianalisis secara kuantitatif oleh Fahmi *et al.* (2024) dalam studi kasus di Kota Metro, Lampung. Data menunjukkan angka konsumsi antibiotik yang sangat masif, yaitu mencapai 20.504 kg per tahun di fasilitas kesehatan kota tersebut. Golongan sefalosporin, khususnya Ceftriaxone, mendominasi penggunaan dengan persentase mencapai 53,8%. Permasalahan lingkungan timbul karena jalur metabolisme manusia tidak mampu menyerap antibiotik tersebut secara sempurna; diestimasi sekitar 10% hingga 70% dari zat aktif diekskresikan kembali melalui urin dan feses ke sistem saluran pembuangan.

Beban farmasi ini membawa konsekuensi ekotoksikologi yang nyata. Melalui penghitungan *Risk Quotient* (RQ), ditemukan bahwa residu Ceftriaxone di lingkungan memiliki nilai RQ sebesar 1,33. Dalam standar toksikologi lingkungan, nilai RQ yang lebih besar dari 1 menunjukkan tingkat risiko yang tinggi bagi organisme akuatik. Hal ini berarti bahwa konsentrasi antibiotik di perairan sudah cukup tinggi untuk menghambat pertumbuhan alga atau mengganggu siklus hidup invertebrata air. Fenomena ini menciptakan ketimpangan ekologis di mana organisme yang sensitif akan mati, sementara bakteri yang mampu beradaptasi dengan kehadiran antibiotik tersebut akan berkembang biak secara eksponensial, mempercepat penyebaran fenomena resistensi di alam liar.

Sementara itu, beberapa penelitian menyebutkan bahwa limbah rumah sakit yang diolah menggunakan teknologi canggih, termasuk pengolahan reaktor biologi membran (MBR), ozonasi, karbon aktif granulasi (GAC) dan pengolahan UV. Menunjukkan hasil bahwa dapat mengurangi keberadaan gen resistensi antibiotik terkait rumah sakit dan konsentrasi antibiotik di instalasi pengolahan air limbah perkotaan yang menerima. Temuan ini mendukung perlunya pengolahan di lokasi dari sumber titik berisiko tinggi gen resistensi antibiotik (Paulus *et al.*, 2019).

#### **d. Pengaruh Residu Non-Antibiotik dan Pengayaan Patogen**

Ancaman tidak hanya datang dari residu antibiotik, melainkan zat-zat farmasi non-antibiotik yang umum digunakan, seperti parasetamol, ibuprofen, dan kafein, ternyata memiliki peran signifikan dalam mengubah komposisi mikrobioma di air limbah. Kehadiran senyawa-senyawa ini ditemukan memicu pengayaan atau peningkatan jumlah patogen yang dapat menginfeksi manusia, hewan, dan tanaman. Mekanisme ini menunjukkan bahwa polusi kimiawi dari obat-obatan sehari-hari pun dapat memperburuk risiko biologis di lingkungan (Suleiman *et al.*, 2026). Selain itu, Giyantolin *et al.* (2025) menyoroti dampak jangka panjang dari residu farmasi ini terhadap kesehatan komunitas. Paparan kronis masyarakat terhadap air yang tercemar residu farmasi dapat menyebabkan perubahan pada mikrobiota usus manusia dan meningkatkan risiko kegagalan pengobatan di masa depan.

Air limbah (*wastewater*) merupakan tempat berkembangnya berbagai mikroorganisme patogen yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem (Aleem *et al.*, 2021). Selain itu, air limbah juga mengandung residu obat-obatan (pharmaceuticals) yang dapat mengubah komposisi mikrobiologi di dalamnya dan berpotensi meningkatkan pertumbuhan patogen. Lingkungan yang tercemar menjadi sekolah bagi bakteri untuk belajar menghadapi berbagai macam senyawa kimia, sehingga memunculkan strain-strain baru yang tidak hanya resisten terhadap satu jenis obat, tetapi bersifat *multi-drug resistant*. Hal ini mengonfirmasi bahwa limbah rumah sakit adalah polutan kompleks yang membutuhkan penanganan multidimensi.

#### **e. Evaluasi Kinerja Sistem Pengolahan Air Limbah (IPAL)**

Salah satu poin krusial dalam ulasan ini adalah evaluasi terhadap efektivitas IPAL konvensional. Kristanto dan Koven (2019), melakukan studi pendahuluan terhadap bakteri *Escherichia coli* yang resisten antibiotik di beberapa unit IPAL di Indonesia. Hasilnya menunjukkan sebuah paradoks: meskipun sistem pengolahan seperti lumpur aktif (*activated sludge*) mampu mengurangi jumlah total bakteri secara signifikan, persentase *E. coli* yang resisten terhadap antibiotik (seperti Cefixime dan Ciprofloxacin) justru mengalami peningkatan setelah proses pengolahan. Hal ini menunjukkan bahwa unit IPAL terkadang berfungsi sebagai bejana inkubasi di mana transfer gen horizontal antarbakteri terjadi secara intensif.

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa limbah dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) adalah sumber antropogenik utama resistensi antibiotik (AR), yang mendukung keberlanjutan dan penyebaran bakteri resisten antibiotik (ARB) dan gen resisten antibiotik (ARG) (WHO, 2017). Secara khusus, konsentrasi ARG dalam efluen IPAL sering lebih tinggi daripada di sungai alami. Akibatnya, pembuangan efluen IPAL ke sungai memfasilitasi penyebaran ARG di lingkungan. Banyak sungai dengan tingkat antibiotik, ARB, dan ARG yang tinggi secara langsung dipengaruhi oleh input air limbah perkotaan (Wu *et al.*, 2023). Hasil penelitian yang dilakukan Kumari *et al.* (2017) menunjukkan bahwa Tingkat resistensi tinggi sebagian besar koloni sensitif terhadap Gentamicin, Meropenem, dan Ciprofloxacin dengan perubahan sensitivitas antara pre- dan post-IPAL untuk antibiotik yaitu sebesar Ampicillin: 20% susceptible, 72% resistant. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat perubahan pola sensitivitas antibiotik antara limbah pre- dan post-IPAL, dengan kecenderungan meningkatnya resistensi setelah pengolahan limbah.

Polutan air terdiri dari polutan organik, anorganik, mikroorganisme/patogen, produk samping disinfektan, dan zat radioaktif. Limbah rumah sakit dapat mengandung bahan kimia berbahaya, logam berat, obat-obatan, dan mikroorganisme patogen. Pencemaran tersebut dapat menyebabkan berbagai penyakit pada manusia dan merusak ekosistem. Pengelolaan limbah yang baik, teknologi pengolahan air yang efektif, serta pengawasan terhadap polutan sangat diperlukan untuk melindungi kesehatan manusia dan menjaga keberlanjutan lingkungan (Zhang *et al.*, 2020).

Selain itu, proses klorinasi yang biasanya menjadi tahap akhir desinfeksi, juga dilaporkan dapat memberikan stres lingkungan yang memicu bakteri untuk masuk ke dalam fase "viable but non-culturable" (VBNC), di mana mereka tetap hidup dan membawa gen resistensi tetapi tidak terdeteksi oleh metode pembiakan standar. Ketidakmampuan IPAL dalam menyaring residu farmasi dan gen resistensi secara sempurna berarti bahwa limbah "terolah" yang dibuang ke sungai tetap membawa beban biologis yang berbahaya. Oleh karena itu, diperlukan teknologi tambahan (*advanced oxidation processes*) atau sistem filtrasi yang lebih canggih untuk menangani polutan mikroskopis ini (KLHK, 2016).

#### **f. Studi Toksikologi pada Organisme Akuatik**

Dampak nyata dari paparan limbah rumah sakit terhadap biota air dibuktikan secara eksperimental oleh Salaah *et al.* (2025). Dalam studi tersebut, ikan *Nile tilapia* dipaparkan pada berbagai konsentrasi limbah rumah sakit untuk melihat efek fisiologis dan biokimianya. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya stres oksidatif yang parah pada ikan yang terpapar. Hal ini ditandai dengan penurunan aktivitas enzim antioksidan seperti Superoxide Dismutase (SOD) dan Catalase (CAT), serta peningkatan kadar Malondialdehyde (MDA) yang merupakan indikator kerusakan membran sel akibat radikal bebas.

Kerusakan jaringan ditemukan pada organ vital ikan, termasuk hati, otak, dan insang. Paparan terhadap campuran kompleks antibiotik dan bahan kimia lainnya dalam limbah memicu kegagalan sistem osmoregulasi dan gangguan saraf pada ikan. Namun, studi ini juga memperkenalkan solusi inovatif berupa penggunaan nanokomposit  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ . Teknologi nanomaterial mampu menyerap dan menghilangkan hingga 85% senyawa farmasi dari air limbah. Lebih penting lagi, penggunaan nanokomposit ini secara signifikan mampu memitigasi efek toksik pada ikan, yang ditunjukkan dengan pulihnya aktivitas enzim antioksidan dan berkurangnya kerusakan jaringan. Ini memberikan arah baru dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah masa depan yang lebih ramah lingkungan (Samal *et al.*, 2022).

Berdasarkan penelitian Fahmi *et al.* (2020) didapatkan perhitungan konsentrasi antibiotik dalam limbah memprediksi bahan aktif seperti ceftriaxone memiliki nilai  $\text{RQ} > 1$ , dan Sekitar 10% antibiotik

diekskresikan ke limbah, dan hanya 51% terbuang melalui pengolahan limbah, sehingga residu antibiotik masuk ke perairan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya risiko ecotoxic terhadap organisme akuatik seperti alga, invertebrata, dan ikan. Hasil ini memperingatkan bahwa pelepasan residu antibiotik dapat menimbulkan pencemaran lingkungan serta mendorong resistensi bakteri. Temuan tersebut mendukung kebutuhan untuk pengelolaan konsumsi antibiotik yang lebih rasional serta pengolahan limbah yang lebih efektif demi menjaga kesehatan ekosistem dan masyarakat karena pelepasan residu yang tidak tepat dapat merusak ekosistem dan meningkatkan resistensi bakteri.

#### **g. Studi Toksikologi pada Rantai Makanan**

Pencemaran antibiotik di lingkungan merupakan isu penting dalam kajian toksikologi lingkungan karena dapat memicu munculnya resistensi antibiotik pada mikroorganisme. Residu antibiotik umumnya berasal dari aktivitas manusia seperti penggunaan antibiotik pada peternakan, limbah domestik, dan sistem pengolahan limbah yang belum optimal. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Aminudin *et al.* (2026) menunjukkan bahwa penggunaan antibiotik yang berlebihan dalam sistem peternakan, khususnya pada industri unggas, menyebabkan akumulasi *Antibiotic Resistance Genes* (ARGs) di lingkungan seperti tanah, air limbah, dan kotoran ternak. Gen resistensi tersebut dapat bertahan lama di lingkungan dan berkontribusi terhadap munculnya bakteri yang resisten terhadap berbagai jenis antibiotik.

Bakteri pembawa gen resisten antibiotik (AMR) yang ditularkan melalui makanan dapat muncul dan berkembang dari pertanian hingga meja makan melalui berbagai proses, seperti penyusunan ulang metabolik, degradasi enzimatis, sistem pompa keluar, mutasi pada situs target, dan preservasi diri (Kim dan Ahn, 2022). Kondisi ini meningkatkan risiko kesehatan bagi manusia, hewan, dan ekosistem karena bakteri resisten dapat masuk ke rantai makanan atau sumber air yang digunakan oleh masyarakat. Beberapa penelitian yang dilakukan di berbagai negara telah menunjukkan bahwa bakteri yang resisten terhadap antibiotik sering ditemukan pada berbagai jenis daging, seperti daging domba, sapi, babi, dan ayam. Menurut sebuah studi di Iran, persentase sampel kebab dan hamburger mentah yang terkontaminasi oleh *S. aureus*, *E. coli*, *Salmonella*, dan *L. monocytogenes* masing-masing adalah 35,5%, 8,1%, 4,8%, dan 1,6% (Rajaei *et al.*, 2021).

Dalam penelitian lain, Ahmed *et al.* (2024) menjelaskan bahwa resistensi antimikroba juga menunjukkan pencemaran antibiotik di lingkungan menjadi faktor penting dalam penyebaran resistensi global. Hasil kajian menunjukkan keberadaan residu antibiotik di lingkungan perairan, tanah, dan limbah industri dapat menciptakan tekanan seleksi pada komunitas mikroba sehingga meningkatkan prevalensi bakteri resisten. Selain itu, penyebaran resistensi antibiotik tidak hanya dipengaruhi oleh penggunaan antibiotik yang berlebihan, tetapi juga oleh pengelolaan limbah yang tidak efektif serta interaksi antara polutan kimia dan mikroorganisme di lingkungan.

Penggunaan antibiotik yang berlebihan mendorong perpindahan gen resistensi antar mikroorganisme dan dapat menyebar ke patogen selain memberikan tekanan selektif pada resistensi antibiotik (Juhasz *et al.*, 2021). Menurut *World Health Organization* (WHO), beberapa bakteri yang ditularkan melalui makanan yang menyebabkan infeksi umum di masyarakat menjadi lebih resisten terhadap pengobatan, dan terdapat tingkat resistensi yang tinggi di antara bakteri yang menyebabkan infeksi aliran darah yang berpotensi fatal. Menurut sebuah penelitian, resistensi antibiotik patogen yang ditularkan melalui makanan berubah dengan pertama menurun dan kemudian meningkat antara tahun 2000 dan 2020. Secara keseluruhan, insiden resistensi patogen isolat pangan menurun dari 75% sebelum 2010 menjadi 72% antara tahun 2011 dan 2015, dan kemudian menjadi 80% antara tahun 2016 dan 2020 (Tao *et al.*, 2022).

## KESIMPULAN

Berdasarkan literatur yang telah direview, dapat disimpulkan bahwa limbah cair rumah sakit menjadi sumber utama polutan biologis dan kimia yang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan resistensi antibiotik serta kerusakan ekosistem. Penggunaan antibiotik yang tidak rasional dan sistem pengolahan limbah yang belum efektif menyebabkan mikroorganisme patogen resisten menyebar ke lingkungan dan rantai makanan, serta memicu munculnya bakteri "superbug" yang jauh lebih sulit dikendalikan. Selain itu, kontaminan kimia seperti residu farmasi non-antibiotik meningkatkan risiko ekotoksikologi dan gangguan keseimbangan ekosistem. Sehingga perlu adanya pendekatan manajemen limbah yang lebih terintegrasi, penggunaan teknologi pengolahan yang canggih, serta pengendalian konsumsi antibiotik secara rasional guna melindungi kesehatan manusia dan keberlanjutan lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. K., Hussein, S., Qurbani, K., Ibrahim, R. H., Fareeq, A., Mahmood, K. A., & Mohamed, M. G. (2024). Antimicrobial resistance: Impacts, challenges, and future prospects. *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*, 2, 100081. <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2024.100081>
- Aleem, M., Azeem, A. R., Rahmatullah, S., Vohra, S., Nasir, S., & Andleeb, S. (2021). Prevalence of bacteria and antimicrobial resistance genes in hospital water and surfaces. *Cureus*, 13(10), e18738. <https://doi.org/10.7759/cureus.18738>
- Aminudin, M. H., Amalina, F., Ab Hamid, M. R., Sulaiman, S., Afza, N., & Razak, A. S. A. (2026). Environmental and public health risks of antibiotic resistance gene pollution in poultry systems: Sustainability impact, transmission pathways, and mitigation strategies. *The Microbe*, 10, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.microb.2026.100658>
- Arhafna, C. H., Fadhliana, N., Firdus., Rizki, A., & Nasir, M. (2025). Studi Toksikologi: mikroplastik pada organisme perairan dan resiko terhadap kesehatan manusia di Indonesia. *Jurnal Jeumpa*. <https://10.33059/jj.v12i1.11379>
- Asfaw, T. (2018). Review on hospital wastewater as a source of emerging drug resistance pathogens. *Journal of Research in Environmental Science and Toxicology*, 7(2), 47–52. <http://dx.doi.org/10.14303/jrest.2018.020>.
- Bakon, S. K., Mohamad, Z. A., Jamilan, M. A., Hashim, H., Kuman, M. Y., Shaharudin, R., Ahmad, N., & Muhamad, N. A. (2023). Prevalence of Antibiotic-Resistant Pathogenic Bacteria and Level of Antibiotic Residues in Hospital Effluents in Selangor, Malaysia: Protocol for a Cross-sectional Study. *JMIR Research Protocols*, 29(12), 1–12. <https://doi.org/10.2196/39022>
- Brown, K. D., Kulis, J., Thomson, B., Chapman, T. H., & Mawhinney, D. B. (2006). Occurrence of antibiotics in hospital, residential, and dairy effluent, municipal wastewater, and the Rio Grande in New Mexico. *Science of the Total Environment*, 366(2-3), 772-783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.10.007>
- Chen, M., Liu, Y., Zhou, Y., Pei, Y., Qu, M., Lv, P., Zhang, J., Xu, X., Hu, Y., & Wang, Y. (2025). Deciphering antibiotic resistance genes and plasmids in pathogenic bacteria from 166 hospital effluents in Shanghai, China. *Journal of Hazardous Materials*, 483, 136562. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136562>
- Deguenon, E., Dognon, V., Houssou, V. M. C., Gbotche, E., Ahoyo, R. A., Fabiyi, K., Agbankpe, J., Mousse, W., Lougbegnou, C., Klotoe, J. R., Tchobo, F., Bankole, H., & Boko, M. (2022). Hospital effluents as sources of antibiotics residues, resistant bacteria and heavy metals in Benin. *SN Applied Sciences*, 4, 206. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05095-9>

- Fahmi, A. G., Abidin, Z., Kusmana, C., & Noor, E. (2024). Antibiotic consumption and antibiotics occurrence into the environment: A case study of hospital in Metro, Lampung. *Current Research on Biosciences and Biotechnology*, 5(2), 22-28. <https://doi.org/10.5614/crbb.2024.5.2/V171EKVT>
- Giyantolin, G., Subiakto, Y., Simorangkir, T. P. H., & Widyati, W. (2025). Hospital wastewater pharmaceutical residues and their impact on community microbial resistance: An epidemiological and pharmaceutical systematic review. *Indonesian Journal of Global Health Research*, 7(3), 1101-1116. <https://doi.org/10.37287/ijghr.v7i3.7148>
- Juhasz, J., Ligeti, B., Gajdács, M., Makra, N., Ostorházi, E., Farkas, F. B., Stercz, B., Tóth, Á., Domokos, J., & Pongor, S. (2021). Colonization dynamics of multidrug-resistant *Klebsiella pneumoniae* are dictated by microbiota cluster group behavior over individual antibiotic susceptibility: A metataxonomic analysis. *Antibiotics*, 10(3), 268. <https://doi.org/10.3390/antibiotics10030268>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2016). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang baku mutu air limbah domestik. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/163527/permen-lhk-no-p68menlhksetjenkum182016-tahun-2016>
- Kim, J., & Ahn, J. (2022). Emergence and spread of antibiotic-resistant foodborne pathogens from farm to table. *Food Science and Biotechnology*, 31(12), 1481-1499. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01157-1>
- Kristanto, P. L., & Koven, W. (2019). preliminary study of antibiotic resistant *Escherichia coli* in hospital wastewater treatment plants in Indonesia. *International Journal of Technology*, 10(4), 765-775. <https://dx.doi.org/10.14716/ijtech.v10i4.776>
- Kumari, M., Pandey, S., Giri, V.P., Bhattacharya, A., Shukla, R., Mishra, A., Nautiyal, C.S., (2017). Tailoring shape and size of biogenic silver nanoparticles to enhance antimicrobial efficacy against MDR bacteria. *Microb. Pathog.* 105, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2016.11.012>
- Kurniawan, I., Mariadi, P. D., & Huda, A. (2019). Hubungan tingkat penggunaan antibiotik di rumah sakit dengan potensi cemaran antibiotik di perairan umum. *Prosiding Seminar Nasional II Hasil Litbangyasa Industri*, 2, 165–173. <https://media.neliti.com/media/publications/453531-none-53765f6a.pdf>
- Kusuma, S. A. F., Rostinawati, T., Hendriani, R., Budiman, M. F., & dan Parwati, I. (2021). Effect of water reservoirs types on the prevalence and antibiotic resistance profiles of *Pseudomonas aeruginosa* isolated from bathroom water in hospitals. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 12(1), 52-56. [10.4103/japtr.JAPTR\\_103\\_20](https://doi.org/10.4103/japtr.JAPTR_103_20)
- Lan, L., Wang, Y., Chen, Y., Wang, T., Zhang, J., & Tan, B. (2025). A review on the prevalence and treatment of antibiotic resistance genes in hospital wastewater. *Toxics*, 13(4), 263. <https://doi.org/10.3390/toxics13040263>
- Mutuku, C., Gazdag, Z., & Melegh, S. (2022). Occurrence of antibiotics and bacterial resistance genes in wastewater: Resistance mechanisms and antimicrobial resistance control approaches. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38, 152. <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03334-0>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paulus, G. K., Hornstra, L. M., Alygizakis, N., Slobodnik, J., Thomaidis, N., & Medema, G. (2019). The impact of on-site hospital wastewater treatment on the downstream communal wastewater system in terms of antibiotics and antibiotic resistance genes. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(4), 635-644. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.01.004>
- Rajaei, M., Moosavy, M. H., Gharajalar, S. N., & Khatibi, S. A. (2021). Antibiotic resistance in the pathogenic foodborne bacteria isolated from raw kebab and hamburger: Phenotypic and genotypic study. *BMC Microbiology*, 21, 272. <https://doi.org/10.1186/s12866-021-02326-8>

- Salaah, S. M., Ali, E. H. A., Mostafa, A. B., Khalil, M. T., & El-Naggar, M. M. (2025). Assessing the ecotoxicological impact of hospital wastewater on Nile tilapia and the mitigating effects of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite. *Scientific African*, 27, e02536. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e02536>
- Samal, K., Mahapatra, S., & Ali, M. H. (2022). Pharmaceutical wastewater as emerging contaminants (EC): Treatment technologies, impact on environment and human health. *Energy Nexus*, 6, 100076. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100076>
- Sambaza, S. S., & Naicker, N. (2023). Contribution of wastewater to antimicrobial resistance: A review article. *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 34, 23-29. <https://doi.org/10.1016/j.jgar.2023.05.010>
- Sib, E., Voigt, A. M., Wilbring, G., Schreiber, C., Faerber, H. A., Skutlarek, D., Parcina, M., Mahn, R., Wolf, D., Brossart, P., Geiser, F., Engelhart, S., Exner, M., Bierbaum, G., & Schmithausen, R. M. (2019). Antibiotic resistant bacteria and resistance genes in biofilms in clinical wastewater networks. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(4), 655-662. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.03.006>
- Tao, Q., Wu, Q., Zhang, Z., Liu, J., Tian, C., Huang, Z., Malakar, P. K., Pan, Y., & Zhao, Y. (2022). Meta-analysis for the global prevalence of foodborne pathogens exhibiting antibiotic resistance and biofilm formation. *Frontiers in Microbiology*, 13, 906490. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.906490>
- Wang, Y., Lu, J., Engelstadter, J., Zhang, S., Ding, P., Mao, L., Yuan, Z., Bond, P. L., & Guo, J. (2020). Non-antibiotic pharmaceuticals enhance the transmission of exogenous antibiotic resistance genes through bacterial transformation. *The ISME Journal*, 14(8), 2179-2196. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-0679-2>
- Wang, Y., Lu, J., Mao, L., Li, J., Yuan, Z., Bond, P. L., & Guo, J. (2021). Non-antibiotic pharmaceuticals promote the transmission of multidrug resistance plasmids through intra- and intergenera conjugation. *The ISME Journal*, 15(9), 2493-2508. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00945-7>
- Wasistha, W. B., Putri, C. D. R., & Airlangga, R. M. H. (2024). Sebaran bakteri dan profil resistensi antibiotik Enterobacter sp pada saluran pembuangan air di salah satu rumah sakit tipe C Malang. *Jurnal Kedokteran Komunitas*, 12(1). <https://jim.unisma.ac.id/index.php/jkkfk/article/view/25873>
- WHO (2017). Global antimicrobial resistance surveillance system (GLASS) report: early implementation 2016-2017. Available at: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/who-259744>
- World Health Organization. (2023). Antimicrobial resistance. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>
- Wu, Y., Li, S., Yu, K., Hu, J., Chen, Q., and Sun, W. (2023). Wastewater treatment plant effluents exert different impacts on antibiotic resistance in water and sediment of the receiving river: metagenomic analysis and risk assessment. *J. Hazard. Mater.* 460:132528. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132528>
- Xia, J., Gao, J., & Tang, W. (2016). Nosocomial infection and its molecular mechanisms of antibiotic resistance. *Biosci Trends*, 10(1), 14-21. <https://doi.org/10.5582/bst.2016.01020>
- Zafar, S., Alimohammadi, M., Moghadam, P. H., & Hadei, M. (2026). Investigating the types of bacterial species with antimicrobial resistance genes in Iran's wastewaters: a systematic review. *Science of The Total Environment*, 965, 176105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181385>
- Zhang, S., Huang, J., Zhao, Z., Cao, Y., & Li, B. (2020). Hospital wastewater as a reservoir for antibiotic resistance genes: A meta-analysis. *Frontiers in Public Health*, 8, 574968. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.574968>