

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Emerging Contaminants* dan Tantangan Global SDGs

Dalam beberapa dekade terakhir, keberadaan ECs di lingkungan perairan telah menjadi perhatian global karena sifatnya yang persisten, bioaktif, dan sulit terdeteksi menggunakan parameter konvensional. Berbeda dengan polutan klasik seperti bahan organik atau logam berat, ECs seringkali tidak menyebabkan perubahan fisik yang terlihat pada air, namun memiliki dampak signifikan terhadap organisme hidup dalam jangka panjang.

Salah satu kelompok ECs yang paling mendapat perhatian adalah antibiotik. Hal ini disebabkan oleh penggunaannya yang luas serta kemampuannya dalam mempengaruhi mikroorganisme pada tingkat seluler. Studi global menunjukkan bahwa lebih dari 600 jenis senyawa farmasi telah terdeteksi di berbagai badan air di seluruh dunia, termasuk sungai, danau, dan air tanah (aus der Beek et al., 2016).

Keberadaan ECs juga memiliki kaitan erat dengan pencapaian Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya target 6.3 yang menekankan peningkatan kualitas air dengan mengurangi polusi dan pelepasan bahan kimia berbahaya. Selain itu, pencemaran ECs di sungai juga berkontribusi terhadap degradasi ekosistem laut melalui aliran transportasi polutan dari darat ke laut (UNEP, 2023).

Dengan demikian, pengelolaan ECs menjadi tantangan besar bagi negara berkembang, termasuk Indonesia, yang sistem pengolahan limbahnya belum dirancang untuk mengatasi mikropolutan secara efektif.

2.2 Karakteristik, Farmakokinetik, dan Nasib Amoxicillin di Lingkungan

Amoxicillin merupakan antibiotik golongan β -lactam yang banyak digunakan dalam pengobatan infeksi bakteri. Secara kimia, senyawa ini memiliki struktur cincin β -lactam yang berperan dalam mekanisme kerjanya, yaitu menghambat sintesis dinding sel bakteri.

Salah satu karakteristik utama Amoxicillin adalah sifatnya yang hidrofilik dengan nilai koefisien partisi oktanol-air (*Log Kow*) yang rendah. Hal ini menyebabkan Amoxicillin cenderung larut dalam air dan memiliki mobilitas tinggi di lingkungan perairan (Kümmerer, 2009). Berbeda dengan senyawa hidrofobik yang mudah terakumulasi dalam sedimen, Amoxicillin lebih banyak ditemukan dalam kolom air.

Dalam tubuh manusia, Amoxicillin tidak sepenuhnya dimetabolisme. Sekitar 60–90% dari dosis yang dikonsumsi akan diekskresikan dalam bentuk aktif, sehingga berpotensi masuk ke lingkungan melalui limbah domestik dan medis (Daughton & Ternes, 1999).

Di lingkungan perairan, Amoxicillin mengalami proses degradasi seperti hidrolisis dan fotolisis. Namun demikian, keberadaan input yang terus-menerus dari aktivitas manusia menyebabkan senyawa ini tetap terdeteksi dalam jangka panjang. Fenomena ini dikenal sebagai pseudo-persistence, yaitu kondisi di mana senyawa tidak benar-benar stabil secara kimia, tetapi terus hadir di lingkungan karena suplai yang berkelanjutan (Kümmerer, 2009).

Faktor lingkungan seperti pH, suhu, intensitas cahaya, serta kandungan bahan organik juga mempengaruhi laju degradasi Amoxicillin. Pada perairan dengan kandungan bahan organik rendah, proses biodegradasi menjadi terbatas, sehingga meningkatkan waktu tinggal (*residence time*) senyawa ini di lingkungan.

2.3 Resistensi Antimikroba (AMR) dan Lingkungan Perairan

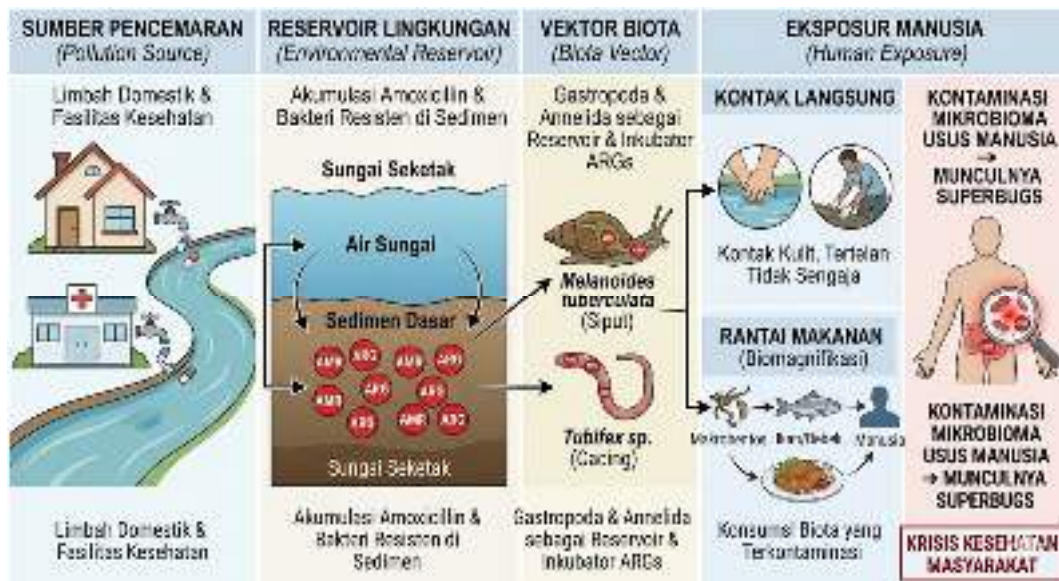
Resistensi Antimikroba (*Antimicrobial Resistance/AMR*) merupakan kondisi di mana mikroorganisme, khususnya bakteri, mengalami perubahan sehingga tidak lagi sensitif terhadap antibiotik yang sebelumnya efektif. Fenomena ini telah diakui sebagai salah satu ancaman terbesar bagi kesehatan global (WHO, 2017).

Lingkungan perairan, terutama sungai yang menerima buangan limbah domestik dan fasilitas kesehatan, berperan sebagai reservoir dan jalur penyebaran AMR. Keberadaan antibiotik dalam konsentrasi rendah (*sub-lethal concentration*) tidak membunuh bakteri secara langsung, tetapi memberikan tekanan seleksi yang mendorong bakteri untuk beradaptasi dan mengembangkan resistensi.

Salah satu mekanisme utama penyebaran resistensi adalah *Horizontal Gene Transfer* (HGT), yaitu perpindahan gen resistensi antar bakteri melalui proses konjugasi, transformasi, atau transduksi. Lingkungan perairan menjadi tempat ideal bagi proses ini karena mempertemukan berbagai jenis bakteri dari sumber yang berbeda (UNEP, 2023).

Selain itu, sedimen sungai seringkali menjadi hotspot bagi akumulasi gen resistensi karena tingginya aktivitas mikroba di dalamnya. Bakteri yang terpapar antibiotik secara kronis dapat menjadi sumber penyebaran gen resistensi ke organisme lain, termasuk patogen yang berbahaya bagi manusia.

Dengan demikian, pencemaran antibiotik di sungai tidak hanya berdampak pada ekosistem, tetapi juga memiliki implikasi serius terhadap kesehatan masyarakat melalui munculnya bakteri resisten atau superbugs.



Gambar 2.1 Perpindahan AMR di Sungai Seketak

Fenomena ini memfasilitasi terjadinya *Horizontal Gene Transfer* (HGT), yaitu perpindahan gen resisten antar bakteri melalui mekanisme konjugasi, transformasi, atau transduksi. Hal ini menyebabkan bakteri yang awalnya sensitif terhadap antibiotik dapat berubah menjadi bakteri resisten. Oleh karena itu, keberadaan antibiotik di sungai bukan hanya masalah toksisitas kimiawi, melainkan ancaman biologis jangka panjang bagi kesehatan masyarakat melalui munculnya *superbugs* (Boutin *et al.*, 2014)."

2.4 Dampak Ekotoksikologi terhadap Biota Akuatik

Antibiotik seperti Amoxicillin tidak hanya mempengaruhi bakteri target, tetapi juga memberikan dampak terhadap organisme non-target di lingkungan perairan. Dampak ini umumnya bersifat sub-lethal, yaitu tidak menyebabkan kematian langsung, tetapi mengganggu fungsi biologis organisme dalam jangka panjang.

Penelitian menunjukkan bahwa residu antibiotik dapat menghambat pertumbuhan mikroalga, mengganggu reproduksi zooplankton, serta mempengaruhi perilaku makan organisme benthik (Andreozzi et al., 2004). Gangguan pada tingkat individu ini dapat berkembang menjadi perubahan pada tingkat populasi dan komunitas.

Salah satu indikator penting dalam menilai dampak ekotoksikologi adalah perubahan struktur komunitas biota. Dalam kondisi terpapar polutan, spesies yang sensitif akan berkurang atau hilang, sementara spesies yang toleran akan mendominasi. Fenomena ini sering disebut sebagai ecological imbalance.

Makrozoobentos seperti *Tubifex* sp. dikenal sebagai organisme yang memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi lingkungan yang tercemar. Dominasi spesies ini sering digunakan sebagai indikator adanya tekanan lingkungan yang signifikan (Hellowell, 1986).

Dengan demikian, analisis biota tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap, tetapi menjadi komponen penting dalam memahami dampak nyata pencemaran terhadap ekosistem.

2.5 Respon Biologi dan Dinamika Komunitas Akuatik terhadap Residu Farmasi

2.5.1 Bioindikator dan Spesies Toleran

Penggunaan biota sebagai indikator kualitas lingkungan (*bioindicator*) memberikan gambaran yang lebih komprehensif dibandingkan analisis kimia sesaat. Dalam ekosistem sungai yang terpapar kontaminan farmasi, makrozoobentos dari famili *Tubificidae* dan *Chironomidae* sering kali muncul sebagai penyintas utama. *Tubifex* sp. memiliki adaptasi fisiologis yang unik, termasuk keberadaan hemoglobin yang efisien untuk mengikat oksigen dalam kondisi stres lingkungan serta mekanisme pertahanan seluler yang mampu menetralkan efek toksik dari polutan tertentu melalui proses bioakumulasi atau ekskresi selektif.

Dominasi spesies ini di lokasi yang memiliki nilai *Risk Quotient* (RQ) tinggi menandakan terjadinya degradasi kualitas lingkungan. Sebagaimana dikemukakan oleh Hellowell (1986), organisme indikator tidak hanya menunjukkan keberadaan polutan, tetapi juga mencerminkan intensitas paparan yang terjadi secara kontinu. Keberadaan *Tubifex sp.* dalam jumlah yang tidak terkendali (monodominasi) merupakan sinyal kuat adanya ketidakseimbangan ekologis, di mana hanya spesies dengan ambang toleransi tinggi yang mampu bertahan hidup.

2.5.2 Konsep Pelepasan Relung (*Ecological Niche Release*)

Struktur komunitas dalam ekosistem perairan diatur oleh interaksi antar-spesies, termasuk kompetisi memperebutkan ruang dan sumber makanan. Masuknya kontaminan *Emerging Contaminants* seperti Amoxicillin dapat mengubah dinamika ini melalui fenomena yang dikenal sebagai Pelepasan Relung (*Niche Release*). Secara teoritis, polutan antibiotik bertindak sebagai filter ekologis yang mengeliminasi taksa-taksa sensitif yang memiliki peran serupa dalam rantai makanan.

Ketika spesies sensitif (seperti larva serangga atau plankton tertentu) tereliminasi, kompetisi terhadap sumber daya berkurang secara drastis. Hal ini memberikan kesempatan bagi spesies oportunistik yang toleran (seperti *Tubifex sp.*) untuk mengisi kekosongan relung tersebut. Tanpa adanya tekanan dari kompetitor alami dan berkurangnya predator yang umumnya lebih rentan terhadap residu kimia, spesies penyintas akan mengalami ledakan populasi secara eksponensial. Fenomena ini menjelaskan mengapa kelimpahan individu pada satu spesies dapat meningkat tajam meskipun keanekaragaman (*diversity*) sistem secara keseluruhan menurun.

2.5.3 Dampak Ekotoksikologi pada Organisme Non-Target

Meskipun antibiotik seperti Amoxicillin dirancang secara spesifik untuk menargetkan jalur metabolik bakteri, keberadaannya di lingkungan perairan memberikan dampak toksik yang signifikan pada organisme non-target. Dampak ini sering kali bersifat sub-lethal, yang tidak langsung mematikan namun mengganggu fungsi biologis jangka panjang.

Menurut Andreozzi et al. (2004), residu antibiotik dapat menghambat laju pertumbuhan mikroalga dan mengganggu siklus reproduksi zooplankton pada konsentrasi yang sangat rendah. Pada makrozoobentos, paparan kronis antibiotik dapat menyebabkan gangguan pada proses molting (pergantian kulit) atau perubahan perilaku makan. Gangguan pada tingkat individu ini pada akhirnya akan terakumulasi menjadi gangguan pada tingkat populasi, yang memicu suksesi komunitas ke arah spesies yang lebih tahan banting namun memiliki kualitas ekosistem yang lebih rendah.

2.5.4 Pengaruh Parameter Fisika-Kimia terhadap Persistensi Antibiotik

Stabilitas senyawa Amoxicillin di badan air sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitarnya. Salah satu parameter krusial adalah ketersediaan bahan organik yang diukur melalui *Biological Oxygen Demand* (BOD). Secara teoritis, degradasi antibiotik di alam sangat bergantung pada aktivitas bakteri heterotrof.

Kümmerer (2009) menjelaskan bahwa bakteri heterotrof memerlukan substrat organik sebagai sumber energi untuk melakukan proses biodegradasi. Pada perairan dengan nilai BOD yang sangat rendah (air jernih), populasi bakteri ini cenderung terbatas, sehingga proses penguraian alami senyawa farmasi menjadi sangat lambat. Kondisi ini menciptakan fenomena *pseudo-persistence*, di mana senyawa antibiotik terus ada di lingkungan dalam jangka waktu yang lama karena tidak adanya proses degradasi biologis yang memadai. Hal ini menjelaskan mengapa risiko ekotoksikologi tetap tinggi meskipun secara fisik air sungai terlihat memenuhi baku mutu standar.



Gambar 2.2 Organisme Bioindikator: (a) Tubifex sp. dan (b) Larva Chironomus

2.6 Kajian Risiko Ekotoksikologi (PEC, PNEC, dan RQ)

Dalam pendekatan ini, terdapat dua parameter utama, yaitu:

1. Predicted Environmental Concentration (PEC)
Merupakan konsentrasi kontaminan yang terukur di lingkungan.
2. Predicted No-Effect Concentration (PNEC)
Merupakan konsentrasi ambang batas di mana tidak terjadi efek negatif terhadap organisme.

Nilai *Risk Quotient* (RQ) dihitung dengan rumus:

$$RQ = PEC / PNEC$$

Interpretasi nilai RQ adalah sebagai berikut:

$RQ < 0,1 \rightarrow$ Risiko rendah

$0,1 \leq RQ < 1 \rightarrow$ Risiko sedang

$RQ \geq 1 \rightarrow$ Risiko tinggi

Pendekatan ini direkomendasikan oleh European Medicines Agency (EMA) sebagai metode standar dalam penilaian risiko lingkungan untuk senyawa farmasi (EMA, 2006).

Keunggulan metode RQ adalah kemampuannya dalam menghubungkan data kimia dengan dampak biologis, sehingga memberikan gambaran risiko yang lebih komprehensif dibandingkan analisis konsentrasi semata.

2.7 Analisis Risiko Kesehatan Manusia (RQhuman)

Selain ekosistem, risiko terhadap manusia dihitung berdasarkan potensi paparan melalui kontak langsung dengan air sungai atau penggunaan air sungai sebagai air baku. Jalur paparan ini krusial karena paparan sub-lethal antibiotik secara terus-menerus dapat memicu reaksi hipersensitivitas pada manusia dan yang paling berbahaya adalah berkontribusi pada munculnya gen resistensi bakteri (*Antimicrobial Resistance/AMR*) di lingkungan sekitar manusia (WHO, 2017).

2.8 Tinjauan Kebijakan dan Regulasi Internasional

Ketidakhadiran regulasi spesifik antibiotik dalam Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 di Indonesia merupakan sebuah celah besar dalam pengelolaan lingkungan. Sebagai perbandingan, beberapa wilayah telah menerapkan langkah progresif:

1. Uni Eropa (EU): Amoxicillin dimasukkan dalam *Watch List* untuk dipantau secara ketat di semua badan air permukaan di bawah koordinasi *Water Framework Directive* (aus der Beek et al., 2016).
2. Tiongkok: Mengingat statusnya sebagai produsen farmasi terbesar, Tiongkok telah mengimplementasikan batas emisi spesifik untuk industri farmasi guna mencegah kerusakan ekosistem sungai.
3. India: Sedang dalam tahap perumusan standar residu antibiotik di sungai untuk menanggulangi krisis AMR yang sangat tinggi di wilayah tersebut (WHO, 2017).

Penelitian terbaru oleh Chowdhury et al. (2022) menekankan bahwa di negara-negara berkembang, beban antibiotik di sungai telah meningkat sebesar 30% akibat kurangnya pengolahan limbah farmasi yang terspesialisasi. Hal ini sejalan dengan laporan UNEP (2023) yang menyatakan bahwa polusi farmasi adalah salah satu pendorong utama krisis lingkungan global yang berdampak pada kesehatan manusia melalui rantai makanan perairan.

2.9 Regulasi Baku Mutu Air Limbah dan Kesenjangan Pengawasan Kontaminan Farmasi

2.9.1 Kerangka Regulasi Limbah Domestik dan Fasilitas Pelayanan Kesehatan (Fasyankes)

Pengelolaan limbah cair di Indonesia diatur secara ketat untuk melindungi badan air penerima dari beban pencemaran yang melampaui kapasitas asimilasinya. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.68/2016, air limbah domestik wajib memenuhi parameter standar seperti pH, BOD, COD, TSS, minyak dan lemak, amoniak, serta total coliform. Bagi Fasilitas Pelayanan Kesehatan (Fasyankes), regulasi ini dipertegas melalui Peraturan Menteri Kesehatan No. 7 Tahun 2019, yang mewajibkan pemantauan terhadap konsentrasi logam berat meliputi Besi (Fe) dengan batas 5 mg/L, Mangan (Mn) 2 mg/L, Merkuri (Hg) 0,002 mg/L, serta Timbal (Pb) 0,1 mg/L.

Selain itu, bagi industri farmasi, Permen LHK No. 5 Tahun 2014 (Lampiran XXXIV) juga telah menetapkan standar baku mutu yang serupa, yang berfokus pada beban organik makro. Namun, tantangan ilmiah yang muncul saat ini adalah belum masuknya parameter residu farmasi, khususnya antibiotik Amoxicillin, ke dalam daftar parameter wajib pantau tersebut. Hal ini menciptakan celah pengawasan (*regulatory gap*) di mana air limbah yang secara legal dianggap "aman" karena memenuhi ambang batas parameter konvensional, sebenarnya masih membawa risiko ekotoksikologi tinggi akibat

keberadaan kontaminan mikropollutan farmasi yang belum diatur standarnya (Prabawati et al., 2020).

2.9.2 Karakteristik Organisme Indikator dalam Tekanan Ekotoksikologi

Penggunaan biota sebagai indikator kualitas lingkungan (*bioindicator*) memberikan dimensi penilaian yang tidak terjangkau oleh analisis kimia standar. Dalam ekosistem yang terpapar residu farmasi secara kronis, terjadi pergeseran struktur komunitas di mana spesies sensitif akan tereliminasi dan digantikan oleh spesies toleran.

Beberapa famili dari *Tubifex sp.* dikenal memiliki mekanisme adaptasi fisiologis yang luar biasa terhadap stres lingkungan, termasuk kemampuan detoksifikasi internal dan hemoglobin yang sangat efisien untuk mengikat oksigen di lingkungan tertekan. Menurut Hellawell (1986), dominasi tunggal oleh spesies ini merupakan indikator terjadinya degradasi fungsional ekosistem. Keberadaan mereka yang melimpah di titik buangan limbah bukan sekadar menunjukkan adanya beban organik, tetapi merupakan respons biologis terhadap hilangnya kompetitor alami akibat tekanan seleksi dari residu antibiotik.

2.9.3 Dinamika Ekosistem: Teori Pelepasan Relung (*Niche Release*)

Struktur komunitas akuatik diatur oleh keseimbangan relung ekologi (*ecological niche*). Masuknya kontaminan baru (*Emerging Contaminants*) seperti Amoxicillin bertindak sebagai filter ekologis yang mengganggu keseimbangan tersebut melalui fenomena Pelepasan Relung (*Niche Release*). Ketika residu antibiotik membunuh mikroorganisme atau larva serangga yang sensitif, terjadi kekosongan peran dan sumber daya dalam ekosistem.

Spesies oportunistik yang memiliki ambang toleransi tinggi terhadap Amoxicillin akan mengisi kekosongan tersebut. Tanpa adanya tekanan dari predator alami dan berkurangnya kompetisi antar-spesies, spesies toleran ini akan mengalami ledakan populasi secara eksponensial. Fenomena ini menjelaskan paradoks yang sering ditemukan pada sungai urban: keanekaragaman (*diversity*) menurun drastis, namun kelimpahan individu pada spesies tertentu meningkat tajam, yang secara keseluruhan menandakan penurunan kesehatan ekosistem secara sistemik.

2.9.4 Fenomena *Pseudo-persistence* dan Kaitan dengan Parameter BOD

Salah satu aspek kritis dalam persistensi Amoxicillin di sungai adalah pengaruh parameter organik konvensional. Kümmerer (2009) menekankan bahwa biodegradasi senyawa farmasi di lingkungan sangat bergantung pada aktivitas bakteri heterotrof yang membutuhkan bahan organik sebagai substrat energi.

Pada kondisi sungai dengan nilai BOD yang sangat rendah (air jernih), populasi bakteri pengurai ini cenderung terbatas sehingga proses penguraian alami senyawa farmasi menjadi sangat lambat. Kondisi ini menciptakan fenomena "Pencemaran Jernih" atau *pseudo-persistence*, di mana senyawa antibiotik terus berada di lingkungan dalam kondisi aktif dalam jangka waktu lama. Hal ini membuktikan bahwa air yang secara visual terlihat bersih dan memenuhi standar baku mutu menurut PP No. 22 Tahun 2021, sebenarnya mengandung risiko ekotoksikologi yang ekstrem bagi komunitas biota dan berpotensi memicu percepatan resistensi antimikroba (AMR).

2.10 Evaluasi Status Mutu Air dan Kontradiksi Parameter Konvensional

Penentuan status mutu air di Indonesia merujuk pada Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 yang membagi kualitas air ke dalam empat klasifikasi berdasarkan peruntukannya. Status mutu ini biasanya dihitung menggunakan metode Indeks Pencemaran (IP) yang membandingkan konsentrasi parameter lapangan dengan baku mutu nasional.

Dalam kajian ekotoksikologi kontemporer, sering ditemukan kontradiksi di mana status mutu air sungai dikategorikan dalam kondisi "Baik" atau "Cemar Ringan" secara fisik-kimia makro, namun memiliki nilai *Risk Quotient* (RQ) yang sangat tinggi (aus der Beek et al., 2016). Hal ini disebabkan karena parameter konvensional seperti BOD dan COD tidak mampu merepresentasikan aktivitas biologis dari residu antibiotik yang aktif pada level mikrogram. Oleh karena itu, integrasi analisis risiko (PEC/PNEC) ke dalam evaluasi kualitas air menjadi krusial untuk memberikan gambaran kesehatan ekosistem yang lebih akurat dan holistik.

2.11 Dampak Antibiotik terhadap Pertumbuhan dan Seleksi Biota

Interaksi antara Amoxicillin dan biota akuatik menghasilkan respon biologis yang kompleks. Secara farmakologis, antibiotik dirancang untuk menginterferensi sintesis dinding sel bakteri. Dalam ekosistem perairan, paparan Amoxicillin pada dosis sub-lethal dapat bertindak sebagai faktor pendorong pertumbuhan (*growth promoter*) pada organisme tertentu dengan cara menekan populasi bakteri patogen dalam sistem pencernaan mereka, mirip dengan mekanisme yang digunakan dalam industri peternakan.

Namun, efek "pertumbuhan" ini pada dasarnya adalah bentuk tekanan seleksi yang merusak keseimbangan biodiversitas (Larsson, 2014). Organisme yang memiliki ketahanan alami atau toleransi tinggi, seperti *Tubifex sp.* dan Larva *Chironomus*, akan menunjukkan kelimpahan individu yang luar biasa tinggi karena hilangnya kompetitor sensitif di relung ekologi yang sama. Tingginya kelimpahan spesies toleran ini merupakan indikator kuat (bio-indikasi) bahwa sungai sedang mengalami tekanan kontaminan kimia yang berat, meskipun secara kasat mata terlihat banyak kehidupan di dalamnya (Boxall, 2004).

2.12 Kajian Empiris Residu Antibiotik di Perairan Indonesia

Penelitian mengenai sebaran residu antibiotik di perairan umum Indonesia telah menunjukkan tren yang mengkhawatirkan di berbagai wilayah. Di Pulau Sumatra, Husein dkk. (2020) melalui studinya yang berjudul "*Analisis Potensi Cemaran Sisa Penggunaan Antibiotik di Perairan Umum (Studi Kasus: Badan Sungai Musi Kota Palembang)*" mengonfirmasi bahwa aktivitas urban dan domestik di sepanjang badan sungai berkontribusi signifikan terhadap masuknya residu farmasi ke lingkungan. Penelitian tersebut menekankan bahwa sungai yang membelah pusat kota memiliki kerentanan tinggi terhadap akumulasi antibiotik akibat kepadatan penduduk dan minimnya sistem pengolahan air limbah yang terspesialisasi.

Sejalan dengan hal tersebut, potensi pencemaran yang bersumber dari aktivitas medis juga terdeteksi di wilayah Indonesia Timur. Kusuma, Rombot, dan Palandeng (2019) dalam penelitiannya mengenai sistem pembuangan limbah cair di RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou Manado, memberikan gambaran nyata bahwa fasilitas kesehatan (faskes) merupakan salah satu titik sumber (*point source*) utama. Meskipun faskes telah memiliki sistem pengolahan limbah cair, residu antibiotik seringkali tetap ditemukan dalam efluen karena tidak terdegradasi secara sempurna oleh proses pengolahan konvensional.

Lebih lanjut, kajian komprehensif oleh Husein dkk. (2023) mengenai pengaruh penggunaan antibiotik di faskes terhadap kualitas perairan umum menyoroti adanya korelasi positif antara intensitas pelayanan kesehatan dengan penurunan kualitas biologi perairan. Studi ini mempertegas bahwa keberadaan kontaminan farmasi di lingkungan bukan hanya sekadar isu kimiawi, melainkan telah menjadi ancaman nyata bagi keberlanjutan ekosistem perairan umum di berbagai kota besar di Indonesia. Integrasi dari berbagai temuan di Palembang, Manado, dan wilayah lainnya ini menunjukkan urgensi diperlukannya kebijakan baku mutu spesifik untuk limbah farmasi guna melindungi ekosistem sungai secara nasional.

2.13 Kesenjangan Regulasi dan *Research Gap*

Meskipun isu pencemaran antibiotik telah menjadi perhatian global, regulasi di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, masih belum mengakomodasi parameter ini secara spesifik. Peraturan yang ada umumnya hanya mencakup parameter konvensional seperti BOD, COD, TSS, dan logam berat.

Kondisi ini menciptakan kesenjangan antara status mutu air secara regulasi dan kondisi ekologis yang sebenarnya. Air yang dinyatakan memenuhi baku mutu belum tentu aman secara biologis karena masih mengandung kontaminan aktif seperti antibiotik.

Penelitian sebelumnya di berbagai negara menunjukkan bahwa konsentrasi antibiotik di perairan urban dapat mencapai tingkat yang berbahaya bagi ekosistem (Chowdhury et al., 2022). Namun, di Indonesia, studi yang mengkaji hubungan antara residu antibiotik, risiko ekotoksikologi, dan struktur komunitas biota masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini memiliki posisi penting dalam mengisi research gap tersebut dengan mengintegrasikan analisis kimia, biologi, dan kebijakan dalam satu kerangka kajian yang komprehensif.

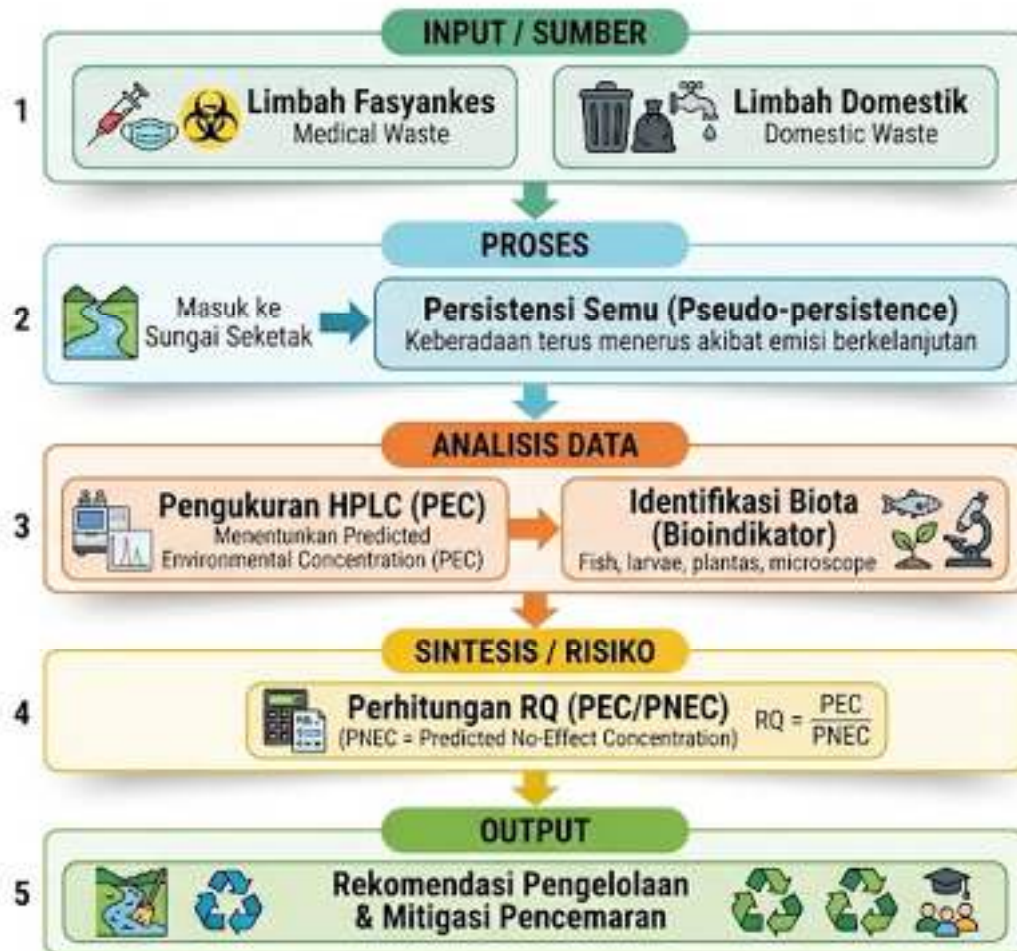
2.14 Kerangka Konsep Penelitian

Kerangka konsep dalam penelitian ini disusun untuk menggambarkan alur pikir sistematis dalam mengevaluasi risiko ekotoksikologi Amoxicillin di Sungai Seketak. Secara fundamental, penelitian ini menghubungkan antara sumber pencemar (*source*), keberadaan kontaminan di lingkungan (*occurrence*), serta dampak dan risiko yang ditimbulkan terhadap ekosistem dan kesehatan manusia (*risk*).

Alur penelitian dimulai dengan identifikasi input Amoxicillin yang berasal dari aktivitas antropogenik di sekitar daerah aliran Sungai Seketak, terutama dari Fasilitas Pelayanan Kesehatan (Fasyankes) dan pemukiman padat penduduk. Limbah cair dari sumber-sumber tersebut, yang seringkali belum terolah secara sempurna oleh IPAL konvensional, membawa residu Amoxicillin masuk ke badan air sungai.

Tahap selanjutnya adalah analisis keberadaan kontaminan melalui pengukuran konsentrasi Amoxicillin secara kuantitatif menggunakan metode HPLC-UV di lima titik sampling yang mewakili hulu hingga hilir. Data konsentrasi terukur ini kemudian disintesis dengan kondisi biotik sungai, di mana residu antibiotik dipandang sebagai tekanan seleksi yang mempengaruhi struktur komunitas organisme bioindikator (seperti *Tubifex sp.*).

Tahap akhir dari kerangka ini adalah analisis risiko. Dengan membandingkan konsentrasi lingkungan terukur (PEC) terhadap ambang batas tanpa efek (PNEC), diperoleh nilai *Risk Quotient* (RQ). Hasil akhir berupa status risiko (rendah, sedang, atau tinggi) akan menjadi dasar dalam merumuskan strategi pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan bagi Sungai Seketak, sejalan dengan target pembangunan berkelanjutan (SDGs).



Gambar 2.3 Diagram Kerangka Konsep Penelitian Kajian Risiko Ekotoksikologi Amoxicillin.