

Ketahanan Masyarakat dan Strategi Adaptif dalam Pengendalian Residu Antibiotik di Perairan Indonesia: Analisis Teoritis Risiko Ekologis dan Tantangan Sosial

Evi Siti Sofiyah, I Wayan Koko Suryawan*, Betanti Ridhosasri, Nurulbaiti Listyendah Zahra

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Perencanaan Infrastruktur, Universitas Pertamina, Jakarta, Indonesia

*Koresponden email: i.suryawan@universitaspertamina.ac.id

Diterima: 18 Oktober 2025

Disetujui: 27 Oktober 2025

Abstract

The increasing use of antibiotics in domestic, livestock, and aquaculture sectors in Indonesia has created long-term social and environmental challenges for communities living around major aquatic ecosystems. This study focuses on assessing social resilience in responding to the impacts of antibiotic residues and natural antimicrobial resistance. The analysis highlights that weak coordination among institutions, low environmental literacy, and limited access to adaptive infrastructure have constrained communities' ability to respond effectively. The assessment of social resilience through four dimensions (learning, interest level, planning, and ability to cope) reveals that community capacity remains low. Most local actors, particularly small-scale fish farmers and households, have limited awareness of how antibiotic use affects water quality and health. Strengthening social resilience therefore requires empowering communities through participatory education, inclusive policy design, and localized monitoring initiatives. Promoting collaboration between local government, academia, and civil society can help integrate social learning into water governance. Under the One Health Water Governance framework, the social dimension becomes central, ensuring that community empowerment, shared responsibility, and behavioral change drive long-term resilience to antimicrobial resistance in Indonesia.

Keywords: *antibiotic residues, antimicrobial resistance, community resilience, ecological risk, adaptive management*

Abstrak

Peningkatan penggunaan antibiotik di sektor rumah tangga, peternakan, dan akuakultur di Indonesia telah menimbulkan tantangan sosial dan lingkungan jangka panjang bagi masyarakat di sekitar ekosistem perairan. Studi ini berfokus pada penilaian ketahanan sosial masyarakat dalam merespons dampak residu antibiotik dan resistensi antimikroba alami. Hasil analisis menunjukkan bahwa lemahnya koordinasi antar lembaga, rendahnya literasi lingkungan, dan keterbatasan akses terhadap infrastruktur adaptif menghambat kemampuan masyarakat untuk merespons secara efektif. Penilaian terhadap empat dimensi ketahanan sosial (*learning, interest level, planning, dan ability to cope*) menunjukkan kapasitas masyarakat masih rendah. Sebagian besar pelaku lokal, khususnya pembudidaya ikan dan rumah tangga kecil, belum memahami keterkaitan antara penggunaan antibiotik, kualitas air, dan kesehatan. Penguatan ketahanan sosial diperlukan melalui pendidikan partisipatif, kebijakan inklusif, serta inisiatif pemantauan berbasis komunitas. Kolaborasi antara pemerintah daerah, akademisi, dan masyarakat sipil perlu diperkuat untuk mengintegrasikan pembelajaran sosial dalam tata kelola air. Melalui kerangka *One Health Water Governance*, dimensi sosial menjadi pusat dari ketahanan, memastikan pemberdayaan masyarakat, tanggung jawab bersama, dan perubahan perilaku sebagai pendorong utama dalam menghadapi resistensi anti mikroba di Indonesia.

Kata Kunci: *residu antibiotik, resistensi antimikroba, ketahanan masyarakat, risiko ekologis, pengelolaan adaptif*

1. Pendahuluan

Antibiotik merupakan salah satu penemuan paling penting dalam sejarah kesehatan manusia, namun penggunaannya yang meluas di sektor medis, peternakan, dan akuakultur telah menimbulkan dampak serius terhadap lingkungan khususnya ekosistem perairan. Di Indonesia, peningkatan konsumsi antibiotik sejalan dengan pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan ekspansi industri akuakultur [1]. Sebagian besar limbah antibiotik dari berbagai sektor ini berakhir di perairan tanpa melalui proses pengolahan yang memadai [2]. Akibatnya, berbagai jenis residu antibiotik terdeteksi dalam air dan sedimen di Waduk Cirata, dengan

konsentrasi yang bervariasi antara puluhan hingga ratusan nanogram per liter [3][4]. Temuan ini menunjukkan adanya tekanan ekologis yang semakin meningkat terhadap kualitas air dan keberlanjutan fungsi ekosistem perairan.

Residu antibiotik di lingkungan air bukan sekadar polutan kimia, melainkan agen biologis yang mampu mengganggu struktur mikroba alami dan mempercepat munculnya bakteri resisten antibiotik atau *antibiotic-resistant bacteria* (ARB) [5][6]. Senyawa seperti *ciprofloxacin*, *sulfamethoxazole*, dan *tetracycline* dikenal memiliki persistensi tinggi dan sulit terurai secara alami. Paparan jangka panjang antibiotik pada ekosistem air dapat memicu resistensi genetik dalam komunitas mikroba yang menghasilkan *antibiotic-resistant genes* (ARGs) [7][8]. Gen-gen ini dapat berpindah melalui proses transfer horizontal antar mikroorganisme dan akhirnya menyebar ke rantai makanan, menimbulkan ancaman langsung terhadap kesehatan manusia. Fenomena ini memperlihatkan keterkaitan erat antara pencemaran antibiotik, resistensi antimikroba dan keamanan pangan serta air minum, menjadikannya sebagai tantangan nyata bagi konsep *One Health* yang menekankan kesatuan antara kesehatan manusia, hewan dan lingkungan [9].

Indonesia menghadapi kesenjangan besar dalam kapasitas pengelolaan dan pengawasan residu antibiotik di lingkungan. Sistem instalasi pengolahan air limbah (IPAL) masih tidak cukup efektif, dan sebagian besar fasilitas ini belum dilengkapi teknologi penghilangan farmasetik seperti karbon aktif, ozonasi, atau filtrasi membrane [10][11][12]. Kondisi ini diperburuk oleh lemahnya koordinasi kelembagaan antara sektor lingkungan, perikanan, kesehatan, dan pertanian. Tidak adanya standar baku mutu nasional untuk antibiotik di air permukaan membuat proses pengendalian menjadi tidak efektif. Selain itu, kegiatan akuakultur skala kecil yang tersebar di berbagai wilayah perairan seperti Cirata dan Saguling masih bergantung pada penggunaan antibiotik sebagai pencegahan penyakit ikan, tanpa pemantauan dosis atau dampak lingkungan. Situasi ini memperlihatkan lemahnya tata kelola adaptif yang seharusnya mampu menyeimbangkan kepentingan ekonomi dan keberlanjutan ekosistem.

Dari sisi sosial, ketahanan masyarakat terhadap ancaman residu antibiotik masih tergolong rendah. Pengetahuan masyarakat mengenai hubungan antara penggunaan antibiotik, pencemaran air, dan kesehatan sangat terbatas. Program penyuluhan yang ada lebih banyak berfokus pada pengelolaan sampah dan limbah padat daripada isu farmasetik [13][14][15]. Masyarakat biasanya baru merespons setelah terjadi gangguan nyata seperti kematian ikan atau menurunnya kualitas air. Rendahnya literasi lingkungan farmasetik ini menghambat partisipasi masyarakat dalam upaya pemantauan dan mitigasi risiko. Selain itu, belum adanya mekanisme insentif sosial dan ekonomi yang mendorong perilaku adaptif membuat upaya transisi menuju praktik budidaya bebas antibiotik sulit dilakukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa dimensi sosial dari pengelolaan resistensi antibiotik belum terintegrasi dengan baik ke dalam kebijakan lingkungan dan perikanan.

Secara ekologis, dampak keberadaan antibiotik di perairan Indonesia telah terlihat jelas. Paparan antibiotik dengan konsentrasi rendah secara terus-menerus dapat mengganggu proses alami seperti nitrifikasi, fotosintesis fitoplankton dan dekomposisi bahan organik. Akibatnya, kemampuan ekosistem dalam menjaga keseimbangan biogeokimia dan melakukan *self-purification* menurun. Beberapa penelitian melaporkan bahwa waduk dan sungai di Pulau Jawa menunjukkan indikasi *mixture toxicity* yang tinggi selama musim hujan, ketika limpasan membawa beban polutan dari permukiman, peternakan, dan area pertanian. Keadaan ini meningkatkan risiko kehilangan keanekaragaman hayati mikroorganisme dan memperbesar kemungkinan terjadinya *bloom cyanobacteria* yang dapat menghasilkan toksin berbahaya bagi manusia dan biota air. Fenomena ini bukan hanya masalah ekologis tetapi juga ekonomi, karena memengaruhi produktivitas ikan dan menurunkan nilai guna waduk sebagai sumber air irigasi dan energi.

Kesenjangan utama yang muncul dari berbagai hasil studi adalah ketiadaan sistem pengendalian antibiotik yang adaptif dan berbasis masyarakat. Upaya yang bersifat teknokratis seperti pembangunan IPAL atau regulasi parsial belum cukup efektif tanpa keterlibatan sosial yang kuat. Diperlukan pendekatan multidisipliner yang menggabungkan pengetahuan ilmiah, kebijakan publik, dan tindakan komunitas lokal. Ketahanan masyarakat menjadi faktor penentu utama yang dapat memperkuat daya tanggap sosial terhadap risiko antibiotik di lingkungan air. Masyarakat yang mampu belajar, memahami risiko, berkolaborasi dalam perencanaan, dan beradaptasi dengan teknologi hijau akan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap ancaman ekologis yang kompleks.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketahanan masyarakat terhadap keberadaan residu antibiotik di perairan Indonesia dan merumuskan strategi adaptif yang dapat memperkuat pengendalian risiko ekologis dan sosial secara berkelanjutan. Melalui pendekatan yang menggabungkan analisis kondisi nasional, kesenjangan sosial-ekologis, serta rekomendasi kebijakan berbasis *One Health Water Governance*, studi ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi

penguatan sistem pengendalian antibiotik di lingkungan air Indonesia, sekaligus mendorong perubahan paradigma dari pengelolaan reaktif menuju sistem adaptif yang kolaboratif dan berkeadilan lingkungan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode tinjauan literatur sistematis (*systematic literature review*) untuk menganalisis kondisi, tantangan, dan strategi adaptif dalam pengendalian residu antibiotik di perairan Indonesia. Pendekatan ini dipilih karena isu residu antibiotik dan resistensi antimikroba bersifat kompleks dan multidimensional, melibatkan aspek lingkungan, sosial, kesehatan, dan kebijakan. Oleh karena itu, pendekatan kualitatif dinilai paling tepat untuk memahami keterkaitan antar faktor tersebut secara mendalam dan menyeluruh. Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder dari berbagai sumber ilmiah, seperti artikel jurnal bereputasi, laporan lembaga nasional dan internasional, serta regulasi dan dokumen kebijakan pemerintah Indonesia yang relevan dengan topik antibiotik di lingkungan perairan. Proses penelusuran dilakukan melalui basis data seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar, menggunakan kata kunci "*antibiotic residues in aquatic environment Indonesia*," "*antimicrobial resistance*," "*community resilience*," "*adaptive management*," dan "*One Health governance*."

Data yang terkumpul kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi, yaitu (1) penelitian yang berfokus pada keberadaan antibiotik di air tawar, sungai, dan waduk di Indonesia atau wilayah Asia Tenggara yang memiliki kondisi serupa, (2) penelitian yang membahas hubungan antara antibiotik dan risiko resistensi mikroba di lingkungan, serta (3) publikasi yang mencakup dimensi sosial, kelembagaan, dan kebijakan pengelolaan kualitas air. Sementara itu, artikel yang tidak memiliki relevansi langsung dengan konteks Indonesia atau tidak menjelaskan mekanisme ekologis dan sosial resistensi antibiotik dikeluarkan dari analisis.

Tahap berikutnya adalah klasifikasi tematik berdasarkan kerangka analisis ketahanan masyarakat (*community resilience framework*) yang terdiri atas empat dimensi utama: *learning*, *interest level*, *planning*, dan *ability to cope*. Dimensi-dimensi ini digunakan untuk menilai bagaimana masyarakat dan institusi di Indonesia merespons isu residu antibiotik dari aspek pengetahuan, kepedulian, perencanaan, dan kemampuan beradaptasi. Literatur yang relevan kemudian dikategorikan ke dalam masing-masing dimensi untuk mengidentifikasi pola kesenjangan dan tantangan di tingkat lokal dan nasional. Pendekatan ini membantu mengungkap sejauh mana kebijakan dan inisiatif yang ada telah mendukung penguatan ketahanan sosial-ekologis dalam menghadapi ancaman antibiotik di air.

Analisis data dilakukan secara kualitatif melalui pendekatan triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan hasil dari penelitian akademik, laporan kebijakan, dan data empiris lapangan yang telah dipublikasikan. Setiap informasi dianalisis menggunakan teknik *content analysis* untuk mengidentifikasi tema-tema utama seperti sumber pencemar dominan, kapasitas pengolahan limbah, risiko ekologis, serta peran masyarakat dalam pengendalian. Hasil analisis tersebut disintesis dalam bentuk narasi tematik yang menggambarkan hubungan antara kondisi eksisting, dampak ekologis, dan kapasitas adaptif masyarakat. Pendekatan ini juga memungkinkan peneliti untuk menelusuri bagaimana dinamika sosial dan kelembagaan memengaruhi efektivitas pengelolaan residu antibiotik di perairan.

Seluruh hasil kajian literatur kemudian disintesis ke dalam dua bagian utama. Pertama, analisis kondisi eksisting yang mencakup sumber pencemar, kapasitas infrastruktur pengolahan, serta kondisi ekosistem dan sosial masyarakat terhadap paparan antibiotik. Kedua, analisis kesenjangan ketahanan masyarakat yang memetakan perbedaan antara kondisi aktual dan kondisi ideal berdasarkan keempat dimensi ketahanan. Hasil sintesis tersebut disajikan dalam bentuk matriks dan tabel tematik yang memudahkan identifikasi titik lemah dan peluang intervensi kebijakan. Secara keseluruhan, metode kualitatif dengan tinjauan literatur ini tidak hanya menggambarkan situasi aktual pencemaran antibiotik di perairan Indonesia, tetapi juga memberikan pemahaman mendalam mengenai aspek sosial dan kelembagaan yang memengaruhi ketahanan masyarakat. Melalui pendekatan ini, penelitian mampu mengintegrasikan bukti ilmiah dan kebijakan untuk merumuskan strategi adaptif yang berbasis *One Health Water Governance*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan konseptual bagi penguatan kebijakan nasional dalam menghadapi krisis resistensi antibiotik di ekosistem perairan Indonesia.

3. Hasil dan Pembahasan

Menurut laporan Global Antimicrobial Resistance and Use Surveillance System (GLASS, WHO 2023) [16], konsumsi antibiotik di kawasan Asia Tenggara meningkat hampir 65% antara tahun 2000–2020 [17], dengan Indonesia menempati salah satu posisi tertinggi. Data Kementerian Kesehatan (2022)

memperkirakan sekitar 60–70% antibiotik yang beredar digunakan di sektor non-medis seperti peternakan unggas, sapi, babi, dan akuakultur, sementara sisanya digunakan di rumah sakit dan rumah tangga. Proporsi besar antibiotik ini berakhir di lingkungan air melalui pembuangan limbah yang tidak diolah sempurna, menciptakan rantai polusi kronis di berbagai daerah aliran sungai utama, di Indonesia [18], [19]. Salah satu tantangan utama dalam pengendalian residu antibiotik di Indonesia terletak pada minimnya sistem pengolahan limbah farmasetik. Berdasarkan studi di Jakarta, hanya sekitar 3% limbah domestik yang diolah melalui [20]. Bahkan, sebagian besar IPAL di kawasan industri dan rumah sakit masih menggunakan sistem konvensional seperti sedimentasi dan aerasi, yang terbukti tidak mampu menghilangkan antibiotik secara efektif [21]. Akibatnya, senyawa antibiotik seperti *ciprofloxacin*, *sulfamethoxazole*, dan *tetracyclines* terdeteksi secara konsisten di sungai dan waduk dengan konsentrasi sampai dengan $238.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [22].

Kondisi ini sejalan dengan temuan penelitian di Waduk Cirata dan Saguling yang menunjukkan keberadaan hingga 24 jenis antibiotik aktif di air dan sedimen, terutama berasal dari kegiatan budidaya ikan dan limbah rumah tangga [3]. Tetrasiklin dan fluoroquinolon merupakan dua kelas antibiotik paling dominan, dengan konsentrasi tertinggi terdeteksi selama musim hujan ketika limpasan (*runoff*) dari daratan meningkat. Keberadaan antibiotik dalam jumlah besar menyebabkan perubahan signifikan terhadap mikrobiota alami, mengganggu keseimbangan biologis, serta menurunkan kemampuan ekosistem dalam melakukan self-purification [23]. Fenomena ini berimplikasi langsung terhadap produktivitas perairan dan menimbulkan risiko *bloom cyanobacteria* yang dapat memproduksi toksin berbahaya bagi manusia dan ikan konsumsi [24]. Selain tantangan ekologis, persoalan resistensi antimikroba di lingkungan air kini diakui sebagai ancaman kesehatan global [25].

Paparan kronis terhadap konsentrasi sub-lethal antibiotik di air dapat menstimulasi seleksi alami terhadap bakteri patogen yang membawa antibiotic-resistant genes (ARGs) [26][27]. ARGs ini dapat berpindah secara horizontal melalui plasmid antarspesies bakteri, menjadikan air permukaan dan sedimen sebagai reservoir resistensi antimikroba alami [28]. Dari perspektif ekologi perairan, keberadaan antibiotik menyebabkan gangguan pada rantai makanan mikrobiologis dan proses biogeokimia alami. Penelitian [29], [30] melaporkan bahwa antibiotik seperti *sulfamethoxazole* dan *lincomycin* dapat menghambat fotosintesis fitoplankton serta memperlambat siklus nitrogen di air. Gangguan ini mengakibatkan menurunnya populasi produsen primer dan memperlemah sistem trofik perairan. Selain itu, sedimentasi residu antibiotik memperpanjang waktu paparan organisme benthik dan meningkatkan efek toksik jangka panjang terhadap spesies seperti *Daphnia magna* dan *Microcystis aeruginosa* [31], [32].

Dengan mempertimbangkan seluruh faktor tersebut, **Tabel 1** menyajikan rangkuman analisis umum kondisi nasional terkait penggunaan antibiotik dan implikasinya terhadap kualitas air serta ketahanan ekosistem. Analisis ini menyoroti empat aspek utama yang saling berhubungan: (1) Sumber pencemar dominan, yang meliputi rumah tangga, rumah sakit, peternakan dan akuakultur, (2) Kapasitas infrastruktur pengolahan limbah, yang masih sangat terbatas dan belum mampu menangani residu farmasetik, (3) Kondisi ekosistem perairan, yang mengalami degradasi biologis akibat paparan antibiotik kronis, dan (4) Dampak sosial–kesehatan masyarakat, yang berpotensi menimbulkan krisis resistensi antibiotik jika tidak dikendalikan secara adaptif.

Masing-masing aspek dalam tabel tersebut mencerminkan keterkaitan antara tekanan antropogenik dan respon ekologis perairan Indonesia. Limbah rumah tangga dan akuakultur menjadi sumber utama pencemar antibiotik yang masuk ke badan air melalui sistem drainase terbuka. Kurangnya pengawasan terhadap penggunaan antibiotik memperparah akumulasi di waduk dan sungai. Di sisi lain, infrastruktur pengolahan air masih tertinggal, dengan cakupan layanan IPAL domestik yang baru mencapai 3% wilayah perkotaan [33], [34]. Hal ini menyebabkan sebagian besar residu farmasetik langsung memasuki sistem hidrologi tanpa penyaringan biologis atau kimia. Kondisi tersebut berimplikasi pada penurunan kualitas air permukaan dan peningkatan risiko *mixture toxicity*, terutama pada musim hujan saat limpasan membawa beban polutan lebih besar. Antibiotik yang tidak terurai sempurna juga dapat menghambat fungsi alami ekosistem seperti dekomposisi bahan organik dan siklus nutrient [35]. Akumulasi residu di sedimen memperpanjang waktu paparan terhadap organisme benthik dan memperbesar potensi resistensi mikroba lingkungan. Dalam konteks sosial, risiko jangka panjang ini berpotensi memicu ancaman terhadap keamanan pangan dan kesehatan Masyarakat yang menandai dimulainya krisis resistensi antibiotik di tingkat nasional.

Secara keseluruhan, **Tabel 1** bertujuan memberikan gambaran sistematis tentang tantangan yang dihadapi Indonesia dalam mengelola kualitas air yang terpapar antibiotik. Analisis tersebut tidak hanya menyoroti kondisi eksisting, tetapi juga menegaskan pentingnya pendekatan adaptif dan lintas sektor. Kolaborasi antara Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Kementerian Kesehatan, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP), serta lembaga riset seperti BRIN dan universitas, menjadi

sangat krusial untuk menciptakan sistem pengendalian berbasis bukti ilmiah (*evidence-based adaptive management*). Tanpa tindakan segera, tekanan kumulatif residu antibiotik dapat menurunkan ketahanan ekosistem perairan nasional dan memperburuk masalah kesehatan masyarakat di masa depan.

Tabel 1. Analisis umum kondisi nasional

Aspek	Deskripsi Kondisi di Indonesia	Dampak Strategis
Sumber Pencemar dominan	Limbah rumah tangga (buangan obat), limbah rumah sakit, peternakan unggas, dan keramba ikan.	Kualitas air permukaan menurun; potensi mixture toxicity tinggi selama musim hujan.
Kapasitas infrastruktur pengolahan	<20% limbah domestik dan peternakan diolah melalui IPAL. Teknologi IPAL konvensional tidak mampu menghilangkan antibiotik sepenuhnya.	Antibiotik tetap lolos ke perairan umum dan menyebabkan seleksi bakteri resisten.
Kondisi ekosistem waduk dan sungai	Terjadi gangguan mikrobiota air dan sedimentasi tinggi residu antibiotik.	Penurunan kemampuan alami self-purification dan peningkatan risiko <i>bloom cyanobacteria</i> .
Dampak sosial dan kesehatan masyarakat	Potensi munculnya <i>antibiotic-resistant bacteria</i> (ARB) dan <i>antibiotic-resistant genes</i> (ARGs) pada air minum, ikan konsumsi, dan sayuran yang diairi.	Ancaman jangka panjang terhadap keamanan pangan dan kesehatan publik (<i>antibiotic crisis</i>).

Ketahanan masyarakat terhadap risiko lingkungan akibat residu antibiotik dan resistensi antimikroba (antimicrobial resistance, AMR) semakin menjadi isu strategis dalam pengelolaan sumber daya air di Indonesia. Berbagai waduk dan sistem sungai besar telah menunjukkan jejak residu antibiotik dengan konsentrasi yang signifikan, yang berasal dari limbah rumah tangga, rumah sakit, peternakan, dan terutama kegiatan akuakultur intensif [4]. Dalam konteks ketahanan sosial-ekologis, resiliensi masyarakat menjadi salah satu elemen kunci dalam mengurangi risiko ekologis dan kesehatan lingkungan [36] [37] [38] [39], [40][41][42]. Ketahanan masyarakat diartikan sebagai kemampuan sosial, kelembagaan, dan teknis masyarakat untuk belajar, beradaptasi, dan merespons ancaman polutan biologis maupun kimia secara berkelanjutan [36][37][38][39][40][41][42]. Namun, kemampuan ini masih rendah di sebagian besar wilayah Indonesia, terutama karena keterbatasan pengetahuan ilmiah, rendahnya koordinasi lintas sektor, dan kurangnya sistem pemantauan yang melibatkan masyarakat.

Dalam kondisi seperti ini, ketahanan masyarakat menjadi faktor penguat yang menentukan efektivitas pengendalian. Masyarakat yang memahami risiko antibiotik, memiliki kemampuan teknis adaptif, dan mampu berkolaborasi lintas sektor cenderung lebih siap menghadapi perubahan kualitas lingkungan. Sebaliknya, jika masyarakat tidak memiliki literasi lingkungan dan kapasitas adaptasi yang memadai, maka kebijakan pengendalian teknis seperti pembangunan IPAL atau rehabilitasi ekosistem tidak akan efektif. Oleh karena itu, **Tabel 2** disusun untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kesenjangan antara kondisi aktual dan kondisi ideal ketahanan masyarakat dalam konteks resistensi antimikroba alami di lingkungan perairan Indonesia. Hasil ini menguraikan empat dimensi utama ketahanan Masyarakat *learning, interest level, planning, dan ability to cope* yang diadaptasi dari kerangka *community resilience model* [36][39][41][43].

Tabel 2. Analisis kesenjangan dan tantangan ketahanan masyarakat terkait resistensi antimikroba alami

Dimensi ketahanan	Kondisi saat ini	Kondisi ideal	Analisis kesenjangan dan tantangan
1. Learning (Kemampuan Belajar dan Pemahaman Lingkungan)	- Pengetahuan masyarakat dan pelaku akuakultur masih sangat rendah terhadap isu residu antibiotik dan resistensi bakteri.	- Masyarakat memahami hubungan antara penggunaan antibiotik, kualitas air, dan kesehatan ekosistem.	- Gap signifikan pada <i>literasi lingkungan farmasetik</i> dan kesadaran antibiotik. - Tantangan utama: keterbatasan sumber daya manusia, minimnya bahan ajar sederhana berbasis bukti (LC-MS/MS data), dan koordinasi antar instansi.
	- Program penyuluhan lingkungan lebih fokus pada pencemaran padat dan limbah organik daripada farmasetik.	- Kurikulum pelatihan lingkungan dan perikanan mencakup konsep antibiotik dan resistensi mikroba.	
	- Kurangnya materi edukasi berbasis sains dalam program pelatihan pemerintah daerah dan universitas lokal.	- Lembaga pendidikan, pemerintah, dan industri melakukan kampanye edukasi berkelanjutan berbasis data riset lokal.	

Dimensi ketahanan	Kondisi saat ini	Kondisi ideal	Analisis kesenjangan dan tantangan
2. Interest Level (Minat dan Kepedulian Sosial terhadap Isu Antibiotik)	- Isu residu antibiotik belum menjadi perhatian publik karena dampaknya tidak langsung terlihat.	- Masyarakat dan pelaku usaha aktif mencari informasi tentang bahaya antibiotik di air.	- Rendahnya minat karena kurangnya <i>risk communication</i> yang menarik.
	- Kepedulian muncul hanya setelah terjadi penurunan hasil ikan atau gangguan kesehatan.	- Tersedia forum publik atau komunitas pemantau kualitas air berbasis warga.	- Perlu integrasi edukasi visual, kampanye sosial media, dan program CSR perikanan untuk meningkatkan empati lingkungan.
	- Media dan pemerintah jarang mengangkat tema resistensi antibiotik dalam isu lingkungan.	- Media lokal dan digital rutin menyoroti hubungan antibiotik–lingkungan–kesehatan.	
3. Planning (Kemampuan Perencanaan Adaptif dan Kolaboratif)	- Pengelolaan perairan bersifat sektoral (PLTA, akuakultur, irigasi, dan sanitasi bekerja sendiri-sendiri).	- Terdapat rencana aksi terpadu lintas sektor untuk pengendalian residu antibiotik.	- Kesenjangan besar antara riset dan kebijakan operasional.
	- Belum ada kebijakan nasional spesifik untuk pemantauan residu antibiotik di perairan.	- Sistem pemantauan berbasis <i>LC-MS/MS</i> dilakukan rutin dan dilaporkan ke publik.	- Tantangan: integrasi data, tumpang tindih kewenangan (KLHK, KKP, PUPR), dan lemahnya sistem <i>early warning</i> .
	- Data spasial dan temporal (misalnya musim hujan vs kemarau) belum digunakan dalam perencanaan.	- Peta risiko antibiotik (per provinsi/waduk utama) digunakan untuk dasar kebijakan pengelolaan.	
4. Ability to Cope (Kemampuan Bertahan dan Beradaptasi)	- Masyarakat akuakultur tidak memiliki alternatif selain penggunaan antibiotik untuk menjaga hasil panen.	- Pelaku usaha memiliki akses pada teknologi alternatif seperti <i>probiotik</i> , sistem biofilter alami, dan <i>eco-aquaculture</i> .	- Gap dalam kapasitas teknis dan finansial.
	- Infrastruktur pengolahan limbah ikan dan air waduk terbatas.	- Komunitas lokal menerapkan manajemen limbah bersama (misal, <i>constructed wetland</i>).	- Tantangan terbesar: ketergantungan terhadap input kimia, kurangnya dukungan kebijakan fiskal hijau, dan lemahnya inovasi berbasis komunitas.
	- Keterbatasan akses ke teknologi budidaya berkelanjutan dan modal hijau.	- Tersedia dukungan keuangan dan pelatihan untuk transisi praktik bebas antibiotik.	

Dimensi *learning* mencerminkan kemampuan masyarakat untuk memperoleh, memahami, dan menggunakan informasi ilmiah mengenai residu antibiotik dan resistensi mikroba. Saat ini, tingkat literasi lingkungan farmasetik masyarakat Indonesia tergolong sangat rendah. Sebagian besar pelaku akuakultur dan peternakan tidak memahami bahwa antibiotik yang mereka gunakan dapat bertahan lama di air dan berdampak pada mikroorganisme alami. Program penyuluhan dari pemerintah daerah masih berfokus pada pengelolaan limbah padat dan organik, bukan limbah kimia-biologis seperti antibiotik. Akibatnya, masyarakat cenderung menganggap pencemaran antibiotik sebagai isu teknis yang hanya menjadi tanggung jawab industri atau rumah sakit. Kondisi ideal yang diharapkan adalah terbentuknya literasi lingkungan farmasetik berbasis sains lokal, di mana masyarakat memahami hubungan antara penggunaan antibiotik, kualitas air, dan kesehatan manusia. Hal ini hanya bisa dicapai dengan dukungan kurikulum lingkungan di sekolah-sekolah perikanan, penyuluhan terintegrasi antara lembaga riset dan pemerintah daerah, serta kampanye publik berbasis bukti (*LC-MS/MS data*). Tantangan utama pada dimensi ini adalah keterbatasan sumber daya manusia dan kurangnya akses terhadap informasi ilmiah yang sederhana namun akurat, terutama di tingkat desa.

Tingkat kepedulian masyarakat terhadap isu antibiotik masih rendah karena dampaknya tidak langsung terlihat, berbeda dengan polusi visual seperti sampah atau minyak. Masyarakat baru merespons ketika hasil ikan menurun atau terjadi gangguan kesehatan. Media massa juga jarang mengangkat isu resistensi antibiotik dalam konteks lingkungan, menyebabkan rendahnya *risk communication*. Kondisi ideal adalah ketika masyarakat dan pelaku usaha aktif mencari informasi tentang antibiotik di air serta terlibat dalam program pemantauan kualitas air berbasis komunitas. Upaya ini dapat diwujudkan melalui pembentukan forum desa hijau atau komunitas peduli air, serta integrasi program CSR perikanan yang mempromosikan praktik bebas antibiotik. Tantangan terbesar di sini adalah rendahnya minat akibat kurangnya komunikasi risiko yang menarik, serta belum adanya model insentif sosial yang mendorong partisipasi aktif.

Perencanaan adaptif menggambarkan sejauh mana masyarakat dan lembaga lokal mampu mengintegrasikan isu residu antibiotik ke dalam tata kelola air dan kebijakan lokal. Saat ini, pengelolaan waduk dan perairan di Indonesia masih bersifat sektoral antara PLTA, irigasi, dan akuakultur berjalan sendiri-sendiri tanpa mekanisme koordinasi. Belum ada kebijakan nasional spesifik mengenai residu antibiotik di air, dan data spasial maupun temporal hasil pemantauan (misal musim hujan vs kemarau) belum digunakan sebagai dasar perencanaan. Kondisi idealnya, pemerintah daerah memiliki rencana aksi lintas sektor berbasis data *LC-MS/MS*, dengan peta risiko antibiotik yang dilaporkan secara publik. Hal ini memungkinkan pendekatan berbasis bukti (*evidence-based policy*) dan memperkuat sistem peringatan dini (*early warning system*). Tantangan utamanya adalah integrasi data yang belum sinkron dan tumpang tindih kewenangan antar instansi seperti KLHK, KKP, dan PUPR, serta minimnya kolaborasi riset operasional lintas lembaga.

Kemampuan masyarakat untuk beradaptasi terhadap perubahan kualitas air sangat dipengaruhi oleh akses terhadap teknologi alternatif dan sumber daya finansial. Sebagian besar pembudidaya ikan di Indonesia masih bergantung pada penggunaan antibiotik untuk mencegah penyakit, karena kurangnya pengetahuan dan modal untuk mengadopsi teknologi biofilter alami atau probiotik. Infrastruktur pengolahan limbah akuakultur (seperti *constructed wetland*) belum tersedia di tingkat komunitas, dan tidak ada dukungan fiskal hijau yang memadai untuk petani kecil. Kondisi ideal menggambarkan masyarakat yang mampu mengelola limbah secara kolektif dengan teknologi ramah lingkungan, memiliki akses pembiayaan transisi menuju sistem eco-aquaculture, dan mampu menjalankan praktik budidaya bebas antibiotik. Untuk mencapai hal ini, pemerintah perlu menyediakan program insentif, pelatihan teknis, dan dukungan kredit mikro hijau. Tantangan terbesar di dimensi ini adalah keterbatasan kapasitas teknis dan finansial masyarakat, serta lemahnya inovasi berbasis komunitas dalam pengelolaan air dan limbah.

Pendekatan *One Health Water Governance* menjadi kerangka integratif yang paling relevan untuk memperkuat ketahanan masyarakat terhadap ancaman residu antibiotik di perairan Indonesia. Pendekatan ini menekankan keterkaitan antara aspek lingkungan, kesehatan, dan ekonomi lokal, sehingga pengendalian antibiotik tidak hanya dipandang sebagai masalah ekologis, tetapi juga sebagai bagian dari sistem sosial-ekonomi yang saling berinteraksi. Dalam konteks lingkungan, *One Health* mendorong pengelolaan kualitas air berbasis bukti ilmiah dengan menggunakan hasil pemantauan residu antibiotik sebagai dasar kebijakan. Data tersebut harus digunakan untuk membangun sistem peringatan dini terhadap risiko antibiotik, sehingga waduk, sungai, dan kawasan akuakultur dapat dikelola secara adaptif dan berkelanjutan. Integrasi ini juga melibatkan sinergi lintas sektor antara KLHK, KKP, Kemenkes, dan PUPR untuk memastikan bahwa kebijakan pengelolaan air tidak bersifat sektoral, tetapi saling melengkapi dalam menjaga keseimbangan ekosistem.

Dari sisi kesehatan, pendekatan *One Health* menegaskan bahwa residu antibiotik di air berkontribusi langsung terhadap penyebaran ARB dan ARGs yang dapat mengancam keamanan pangan dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, kolaborasi antara lembaga kesehatan dan lingkungan sangat penting untuk mengembangkan sistem pemantauan gabungan yang mampu mendeteksi risiko resistensi sejak tahap awal. Pendidikan lingkungan berbasis sains lokal juga menjadi bagian dari strategi kesehatan preventif dengan meningkatkan literasi masyarakat tentang hubungan antara penggunaan antibiotik, kualitas air, dan kesehatan manusia. Dari perspektif ekonomi lokal, *One Health Water Governance* membuka peluang bagi pengembangan model ekonomi sirkular berbasis ekologi, seperti sistem eco-aquaculture yang bebas antibiotik dan berorientasi ekspor hijau. Pemerintah perlu mendorong inovasi pembiayaan melalui skema kredit mikro hijau dan insentif fiskal bagi petani ikan serta pelaku usaha kecil yang menerapkan praktik ramah lingkungan. Dengan demikian, peningkatan kualitas air tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi baru bagi masyarakat. Melalui kolaborasi lintas sektor dan partisipasi komunitas lokal, *One Health Water Governance* dapat menjadi fondasi kebijakan adaptif yang menyatukan perlindungan lingkungan, kesehatan publik, dan kesejahteraan ekonomi masyarakat secara berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Studi ini menunjukkan bahwa keberadaan residu antibiotik di perairan Indonesia telah mencapai tingkat yang mengkhawatirkan baik secara ekologis maupun sosial. Hasil analisis mengindikasikan bahwa antibiotik dari sektor rumah tangga, rumah sakit, peternakan, dan akuakultur berkontribusi signifikan terhadap pencemaran air, dengan berbagai senyawa seperti ciprofloxacin, sulfamethoxazole, dan tetracyclines ditemukan dalam konsentrasi tinggi di air dan sedimen. Paparan kronis ini telah menurunkan kemampuan alami perairan dalam melakukan self-purification, memicu risiko mixture toxicity, serta mendorong terbentuknya bakteri dan gen resisten antibiotik (ARB dan ARGs). Ketahanan masyarakat terhadap risiko ini masih rendah, yang terlihat dari lemahnya literasi lingkungan, kurangnya koordinasi

lintas sektor, serta terbatasnya infrastruktur pengolahan limbah. Empat dimensi ketahanan *learning, interest level, planning, dan ability to cope* menunjukkan kesenjangan nyata antara kondisi saat ini dan kondisi ideal yang diharapkan. Masyarakat belum memiliki kapasitas teknis dan sosial yang cukup untuk memahami, memantau, serta merespons dampak antibiotik di air.

Untuk mengatasi situasi ini, dibutuhkan pendekatan adaptif dan kolaboratif berbasis *One Health Water Governance* yang mengintegrasikan aspek lingkungan, kesehatan, dan ekonomi lokal. Pemerintah perlu memperkuat sistem pemantauan antibiotik nasional, menetapkan baku mutu air terhadap antibiotik, mengembangkan teknologi pengolahan alami yang efisien, serta meningkatkan partisipasi masyarakat melalui edukasi dan insentif hijau. Dengan langkah-langkah strategis tersebut, Indonesia dapat mengurangi risiko resistensi antimikroba di lingkungan air dan memperkuat ketahanan sosial-ekologis demi keberlanjutan sumber daya air dan kesehatan masyarakat.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM) Universitas Pertamina atas dukungan pendanaan melalui Program UPPERRESEARCH 2023.

6. Referensi

- [1] N. Wiratama, A. Uchuwittayakul, Y. Susanto, H. B. Utari, N. Muna, and M. C. Satriagasa, "Mapping spatial analysis of fish disease incidence and antibiotic resistance trends in selected provinces of Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2024, p. 12004.
- [2] P. Sharma, L. Rani, A. S. Grewal, and A. L. Srivastav, "Impact of pharmaceuticals and antibiotics waste on the river ecosystem: a growing threat," in *Ecological Significance of River Ecosystems*, Elsevier, 2022, pp. 15–36.
- [3] M. Ariyani, L. J. M. Jansen, P. Balzer-Rutgers, N. Hofstra, P. van Oel, and M. G. M. van de Schans, "Antibiotic residues in the cirata reservoir, Indonesia and their effect on ecology and the selection for antibiotic-resistant bacteria," *Environ. Res.*, vol. 262, p. 119992, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119992>.
- [4] M. Ariyani, P. R. van Oel, M. G. M. van de Schans, Q. Zhang, S. Li, and N. Hofstra, "Modelling antibiotics in a densely populated reservoir catchment: insights from Cirata Reservoir, Indonesia," *Environ. Pollut.*, p. 126583, 2025.
- [5] A. Singh, S. G. Pratap, and A. Raj, "Occurrence and dissemination of antibiotics and antibiotic resistance in aquatic environment and its ecological implications: a review," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 35, pp. 47505–47529, 2024.
- [6] M. Apreja, A. Sharma, S. Balda, K. Kataria, N. Capalash, and P. Sharma, "Antibiotic residues in environment: antimicrobial resistance development, ecological risks, and bioremediation," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 3355–3371, 2022.
- [7] Z. Wu, X. Shao, and Q. Wang, "Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in the Environment: Dissemination, Ecological Risks, and Remediation Approaches," *Microorganisms*, vol. 13, no. 8, p. 1763, 2025.
- [8] S. Bombaywala, A. Mandpe, S. Paliya, and S. Kumar, "Antibiotic resistance in the environment: a critical insight on its occurrence, fate, and eco-toxicity," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 20, pp. 24889–24916, 2021.
- [9] B. Aslam *et al.*, "Antibiotic resistance: one health one world outlook," *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 11, p. 771510, 2021.
- [10] K. Kosek *et al.*, "Implementation of advanced micropollutants removal technologies in wastewater treatment plants (WWTPs) - Examples and challenges based on selected EU countries," *Environ. Sci. Policy*, vol. 112, pp. 213–226, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.011>.
- [11] J. Reungoat, B. I. Escher, M. Macova, F. X. Argaud, W. Gernjak, and J. Keller, "Ozonation and biological activated carbon filtration of wastewater treatment plant effluents," *Water Res.*, vol. 46, no. 3, pp. 863–872, 2012.
- [12] C. Gadipelly *et al.*, "Pharmaceutical industry wastewater: review of the technologies for water treatment and reuse," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, no. 29, pp. 11571–11592, 2014.
- [13] C. Armijo-de Vega, S. Ojeda-Benítez, Q. Aguilar-Virgen, and P. A. Taboada-González, "Solid waste management in a mexican university using a community-based social marketing approach," *open waste Manag. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 146–154, 2010.

- [14] M. S. Hossain, A. Santhanam, N. A. N. Norulaini, and A. K. M. Omar, "Clinical solid waste management practices and its impact on human health and environment—A review," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 754–766, 2011.
- [15] U. Leknoi, A. Yiengthaisong, and S. Likitlersuang, "Social factors influencing waste separation behaviour among the multi-class residents in a megacity: A Survey analysis from a community in Bangkok, Thailand," *Sustain. Futur.*, vol. 7, p. 100202, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100202>.
- [16] M. Hope *et al.*, "Progress on implementing the WHO-GLASS recommendations on priority pathogen-antibiotic sensitivity testing in Africa: A scoping review," *Wellcome open Res.*, vol. 9, p. 692, 2024.
- [17] M. W. Gach *et al.*, "Antimicrobial resistance among common bacterial pathogens in Indonesia: a systematic review," *Lancet Reg. Heal. Asia*, vol. 26, 2024.
- [18] J. L. Wilkinson *et al.*, "Pharmaceutical pollution of the world's rivers," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 119, no. 8, p. e2113947119, 2022.
- [19] A. Sudaryanto *et al.*, "Occurrence of emerging contaminants in Jakarta Bay, Indonesia: pharmaceuticals and personal care products," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2023, p. 12050.
- [20] S. Soetono, "Pengelolaan Air Limbah Domestik Dki Jakarta di Tinjau Dari Pengelolaan Air Limbah Domestik Di Singapura," *J. Publicuho*, vol. 7, no. 2, pp. 904–915, 2024.
- [21] B. L. Phoon *et al.*, "Conventional and emerging technologies for removal of antibiotics from wastewater," *J. Hazard. Mater.*, vol. 400, p. 122961, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122961>.
- [22] C. Li, Y. Xu, and W. Song, "Pollution characteristics and risk assessment of typical antibiotics and persistent organic pollutants in reservoir water sources," *Water*, vol. 15, no. 2, p. 259, 2023.
- [23] P. Grenni, V. Ancona, and A. B. Caracciolo, "Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review," *Microchem. J.*, vol. 136, pp. 25–39, 2018.
- [24] H. W. Paerl, R. S. Fulton, P. H. Moisaner, and J. Dyble, "Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria," *Sci. World J.*, vol. 1, no. 2, pp. 76–113, 2001.
- [25] M. Ferri, E. Ranucci, P. Romagnoli, and V. Giaccone, "Antimicrobial resistance: A global emerging threat to public health systems," *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 57, no. 13, pp. 2857–2876, 2017.
- [26] M. Amarasiri, D. Sano, and S. Suzuki, "Understanding human health risks caused by antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistance genes (ARG) in water environments: Current knowledge and questions to be answered," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 19, pp. 2016–2059, 2020.
- [27] L. Liu *et al.*, "Differential dose-response patterns of intracellular and extracellular antibiotic resistance genes under sub-lethal antibiotic exposure," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 260, p. 115070, 2023.
- [28] C. J. H. Von Wintersdorff *et al.*, "Dissemination of antimicrobial resistance in microbial ecosystems through horizontal gene transfer," *Front. Microbiol.*, vol. 7, p. 173, 2016.
- [29] X. Liu *et al.*, "Antibiotics disrupt bacteria-phytoplankton symbioses: unveiling ecological risks in aquatic ecosystems," *Oikos*, p. e11201, 2025.
- [30] J. Guo, K. Selby, and A. B. A. Boxall, "Effects of antibiotics on the growth and physiology of chlorophytes, cyanobacteria, and a diatom," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 71, no. 4, pp. 589–602, 2016.
- [31] Y. Feng, J. Hu, Y. Chen, J. Xu, B. Yang, and J. Jiang, "Ecological response to antibiotics re-entering the aquaculture environment with possible long-term antibiotics selection based on enzyme activity in sediment," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 13, pp. 19033–19044, 2022.
- [32] L. Liu, W. Wu, J. Zhang, P. Lv, L. Xu, and Y. Yan, "Progress of research on the toxicology of antibiotic pollution in aquatic organisms," *Acta Ecol. Sin.*, vol. 38, no. 1, pp. 36–41, 2018.
- [33] W. Brontowiyono *et al.*, "Communal Wastewater Treatment Plants’ Effectiveness, Management, and Quality of Groundwater: A Case Study in Indonesia," 2022. doi: [10.3390/w14193047](https://doi.org/10.3390/w14193047).
- [34] R. Wulandari *et al.*, "Water pollution and sanitation in Indonesia: a review on water quality, health and environmental impacts, management, and future challenges," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 58, pp. 65967–65992, 2024, doi: [10.1007/s11356-024-35567-x](https://doi.org/10.1007/s11356-024-35567-x).
- [35] L. Fang *et al.*, "Impact of residual antibiotics on microbial decomposition of livestock manures in Eutric Regosol: Implications for sustainable nutrient recycling and soil carbon sequestration," *J.*

- Environ. Sci.*, vol. 147, pp. 498–511, 2025.
- [36] N. Ulhasanah, S. Suhardono, C.-H. Lee, A. S. Faza, A. Zahir, and I. W. K. Suryawan, “Modelling participation in waste bank initiatives at public transport hubs to advance circular economy development,” *Discov. Sustain.*, vol. 6, no. 1, p. 153, 2025, doi: 10.1007/s43621-025-00940-4.
- [37] E. S. Sofiyah, S. Suhardono, I. W. K. Suryawan, and L. Chun-Hung, “Local willingness to fund climate-resilient water utilities in a tourism-dependent region of Indonesia,” *Util. Policy*, vol. 96, p. 102018, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2025.102018>.
- [38] S. Suhardono, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, “Trends in citizen influencing willingness to participate in marine debris management and social well-being in Bali metropolitan, Indonesia,” *Urban Gov.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2024.12.005>.
- [39] B.-C. Yang, C.-H. Lee, and I. W. Koko Suryawan, “Consumers’ willingness to pay and importance-performance gaps for resilient e-waste management in Taiwan,” *J. Clean. Prod.*, p. 144313, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144313>.
- [40] I. W. K. Suryawan, S. Suhardono, and C.-H. Lee, “Boosting beach clean-up participation through community resilience hypothetical scenarios,” *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 207, 2024.
- [41] E. S. Sofiyah, S. Suhardono, C.-H. Lee, B. Ridhosari, and I. W. Koko Suryawan, “Gendered importance-performance perspective on sanitation resilience programs,” *Health Place*, vol. 95, p. 103530, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2025.103530>.
- [42] E. S. Sofiyah *et al.*, “Adaptive governance in the water-energy-food-ecosystem nexus for sustainable community sanitation,” *World Dev. Sustain.*, p. 100220, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wds.2025.100220>.
- [43] S. Suhardono, L. Fitria, W. Prayogo, C.-H. Lee, and I. W. K. Suryawan, “Enhancing community engagement with digital twins: Technological adoption in marine debris management,” *J. Urban Manag.*, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jum.2025.04.008>.