



KUALITAS AIR DAN RISIKO PENYAKIT BERBASIS LINGKUNGAN PADA MASYARAKAT

Abdul Gafur^{✉1}, Eka Apriyanti^{2*}

^{1,2}Universitas Negeri Makassar,

Korespondensi : abdul_gafur@unm.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan tinjauan literatur sistematis mengenai hubungan kualitas air dan risiko penyakit berbasis lingkungan pada masyarakat. Kajian ini menganalisis sumber serta jenis kontaminan, meliputi pencemar mikrobiologis, kimiawi, dan geogenik, beserta proses fisik, kimia, dan biologis yang memengaruhi pergerakan serta paparan polutan. Kontaminasi fekal, khususnya oleh bakteri indikator, dapat meningkatkan risiko diare dan infeksi enterik, sedangkan paparan berulang terhadap logam berat, metaloid, senyawa organik, dan bahan kimia pertanian berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan kronis. Namun, keamanan air tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan klasifikasi sumber atau satu kali pengukuran *Escherichia coli*, karena kualitas air berubah sepanjang rantai pengumpulan, penyimpanan, dan penggunaan serta dipengaruhi jalur paparan lain. Sintesis ini juga menunjukkan bahwa risiko penyakit dipengaruhi interaksi antara kondisi sanitasi, perilaku higiene, status sosial ekonomi, kerentanan biologis, dan kapasitas layanan kesehatan. Oleh karena itu, pengendalian memerlukan pemantauan terpadu, inspeksi sanitasi, pengelolaan berbasis risiko, perlindungan sumber air, serta intervensi rumah tangga dan kebijakan lintas sektor..

Kata Kunci: Kualitas air, risiko penyakit, lingkungan

PENDAHULUAN

Akses terhadap air minum yang aman merupakan determinan penting kesehatan masyarakat sekaligus bagian dari agenda pembangunan berkelanjutan. Konsep air minum yang dikelola secara aman tidak hanya mensyaratkan keberadaan sumber yang telah diperbaiki, tetapi juga ketersediaan di lokasi yang mudah dijangkau, keberlanjutan layanan, serta bebas dari kontaminasi fekal dan bahan kimia prioritas (Bain et al., 2021). Meskipun demikian, pemetaan global menunjukkan bahwa lebih dari empat miliar orang belum memperoleh layanan air minum yang sepenuhnya dikelola secara aman, dengan kesenjangan paling nyata di wilayah perdesaan negara berpendapatan rendah (Greenwood et al., 2024).

Dalam konteks tersebut, air tanah menempati posisi strategis karena menjadi sumber utama bagi kebutuhan domestik, pertanian, dan aktivitas ekonomi di banyak wilayah. Namun, air tanah tidak dapat dipandang sebagai sumber yang secara otomatis terlindungi dari pencemaran. Tinjauan mutakhir menunjukkan bahwa kualitas air tanah dipengaruhi oleh interaksi antara proses geogenik, penggunaan lahan, perubahan iklim, aktivitas pertanian, praktik sanitasi, serta pengelolaan limbah yang tidak memadai (Abanyie et al., 2023). Kompleksitas tersebut menjadikan perlindungan air tanah sebagai persoalan kesehatan lingkungan yang memerlukan pendekatan lintas sektor.

Permasalahan utama yang mendasari kajian ini adalah adanya kesenjangan antara status administratif suatu sumber air dan keamanan air yang benar-benar dikonsumsi masyarakat. Sumber air yang dikategorikan sebagai sumber air layak belum tentu bebas dari kontaminasi mikrobiologis karena kualitas air dapat berubah selama pengambilan, pengangkutan, penyimpanan, dan penggunaan di

tingkat rumah tangga. Analisis terhadap survei rumah tangga di 27 negara berpendapatan rendah dan menengah menunjukkan pentingnya pengukuran kualitas air pada titik pengambilan maupun titik penggunaan, sebab kedua lokasi tersebut merepresentasikan tahapan paparan yang berbeda (Bain et al., 2021).

Kontaminasi fekal menjadi perhatian utama karena berkaitan dengan masuknya berbagai mikroorganisme patogen ke dalam rantai konsumsi manusia. Paparan tersebut dapat berkontribusi terhadap penyakit diare dan infeksi enterik, terutama pada kelompok yang memiliki kerentanan biologis atau hidup dalam lingkungan dengan sanitasi terbatas. Namun, pengukuran *Escherichia coli* pada satu waktu tertentu memiliki keterbatasan karena tidak sepenuhnya menangkap variasi temporal kualitas air, perbedaan daya tahan patogen, maupun jalur kontaminasi lain melalui tanah, pangan, tangan, dan serangga (Greenwood et al., 2024). Oleh sebab itu, pemantauan kualitas air perlu dilengkapi dengan inspeksi sanitasi dan pendekatan pengelolaan berbasis risiko.

Selain bahaya mikrobiologis, pencemar kimiawi dapat menimbulkan dampak kesehatan yang berlangsung secara kumulatif dan kronis. Air tanah dapat mengandung logam berat, metaloid, senyawa organik persisten, bahan kimia pertanian, serta kontaminan baru yang berasal dari proses alamiah maupun aktivitas manusia (Xie et al., 2023). Berbeda dari kontaminasi fekal yang sering berhubungan dengan kejadian akut, paparan berulang terhadap bahan kimia dapat berlangsung tanpa gejala segera, tetapi berpotensi memengaruhi berbagai sistem biologis dalam jangka panjang. Karena itu, evaluasi keamanan air perlu menggabungkan indikator mikrobiologis, kimiawi, hidrologis, dan sosial.

Risiko penyakit berbasis lingkungan juga tidak terdistribusi secara merata di antara kelompok masyarakat. Penduduk perdesaan, rumah tangga berpendapatan rendah, serta komunitas yang tinggal di wilayah dengan infrastruktur sanitasi dan pengawasan terbatas cenderung memiliki pilihan sumber air yang lebih sedikit dan kapasitas pengolahan yang lebih rendah. Kesenjangan geografis tersebut diperkuat oleh variasi iklim, perubahan pola curah hujan, dan keterbatasan data berkualitas tinggi mengenai kondisi air pada skala lokal (Greenwood et al., 2024). Dengan demikian, penilaian risiko tidak cukup dilakukan melalui rata-rata populasi, melainkan perlu memperhatikan karakteristik tempat tinggal, kondisi sosial ekonomi, serta pola pemanfaatan air.

Bukti penelitian dalam lima tahun terakhir juga menunjukkan bahwa hubungan antara kualitas air dan penyakit tidak bersifat linear maupun sederhana. Kontaminasi air dapat berinteraksi dengan kualitas sanitasi, perilaku higiene, status gizi, akses layanan kesehatan, dan paparan lingkungan lainnya. Kajian mengenai hubungan pencemaran air dengan kesehatan manusia menegaskan bahwa intervensi peningkatan kualitas air dapat berkontribusi pada penurunan diare, tetapi efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh penerapan, pemeliharaan, dan kepatuhan pengguna (Lin et al., 2022). Oleh karena itu, strategi pencegahan perlu mengombinasikan intervensi pada sumber air, rumah tangga, lingkungan, dan sistem pelayanan publik.

Berdasarkan uraian tersebut, kajian ini bertujuan menganalisis secara sistematis hubungan antara kualitas air dan risiko penyakit berbasis lingkungan pada masyarakat. Analisis difokuskan pada sumber serta jenis kontaminan, jalur paparan, kelompok populasi yang rentan, konsekuensi kesehatan, dan strategi pengelolaan yang dapat diterapkan. Tinjauan ini juga berupaya mengidentifikasi keterbatasan pendekatan pemantauan yang hanya mengandalkan satu indikator, sekaligus menegaskan pentingnya tata kelola air yang mengintegrasikan bukti hidrologis, mikrobiologis, epidemiologis, sosial, dan kebijakan. Safeguarding kesehatan masyarakat dengan demikian memerlukan pengendalian sumber pencemar, pemantauan lintas skala, penguatan sanitasi, serta penyediaan layanan air yang adil dan berkelanjutan (Bain et al., 2020; Xie et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Strategi pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui penelusuran basis data akademik seperti PubMed, Scopus, dan Web of Science untuk mencakup temuan yang komprehensif dalam satu dekade terakhir. Kata kunci disusun berdasarkan beberapa konsep utama, yaitu kualitas air, air tanah, kontaminasi mikrobiologis, pencemar kimiawi, penyakit berbasis lingkungan, kesehatan masyarakat, sanitasi, dan paparan rumah tangga. Istilah tersebut dikombinasikan menggunakan operator Boolean *AND* dan *OR*, serta disesuaikan dengan karakteristik setiap basis data. Strategi ini dirancang agar mampu menjangkau penelitian epidemiologis, hidrologis, mikrobiologis, toksikologis, dan kebijakan yang relevan dengan hubungan antara kualitas air dan risiko kesehatan (Lin et al., 2022).

Sumber yang diperoleh kemudian diseleksi melalui beberapa tahap, meliputi penghapusan duplikasi, penyaringan judul dan abstrak, serta penilaian teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Artikel dimasukkan apabila merupakan publikasi akademik yang membahas kualitas air sebagai paparan atau faktor risiko, melaporkan indikator mikrobiologis maupun kimiawi, serta menguraikan dampaknya terhadap penyakit atau kondisi kesehatan masyarakat. Studi yang tidak berkaitan langsung dengan air untuk konsumsi atau penggunaan domestik, tidak menyediakan informasi metodologis yang memadai, berupa opini, editorial, atau laporan yang tidak melalui proses penelaahan sejawat, dikeluarkan dari kajian. Proses penyaringan dilakukan secara bertahap dengan mencatat alasan eksklusi pada setiap tahap agar alur seleksi dapat ditelusuri dan dilaporkan secara transparan, sebagaimana praktik yang umum digunakan dalam tinjauan sistematis (Darling et al., 2023).

Data dari artikel terpilih diekstraksi menggunakan matriks yang mencakup identitas publikasi, lokasi penelitian, karakteristik populasi, jenis sumber air, indikator kontaminasi, metode pengukuran, desain penelitian, jalur paparan, luaran kesehatan, serta keterbatasan penelitian. Sintesis dilakukan secara naratif dan tematik dengan mengelompokkan temuan berdasarkan jenis pencemar, mekanisme paparan, kelompok rentan, dan konsekuensi kesehatan. Meta-analisis tidak diterapkan secara otomatis karena perbedaan desain penelitian, definisi paparan, metode pengujian kualitas air, dan ukuran luaran dapat menghasilkan heterogenitas yang tinggi; oleh karena itu, kekuatan bukti dibandingkan melalui konsistensi arah hubungan, kualitas metodologis, ukuran sampel, pengendalian faktor perancu, serta relevansi konteks geografis (Overbo et al., 2016).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan dan Sintesis Artikel Terpilih

No.	Artikel dan tahun	Fokus kajian	Temuan utama	Pola atau perbedaan hasil
1	Chohan et al. (Chohan et al., 2020)	Paparan PFAS melalui air dan dampaknya terhadap kesehatan	PFAS dalam air dikaitkan dengan berbagai gangguan kesehatan, termasuk masalah kesehatan perempuan, sehingga diperlukan reformasi regulasi dan penguatan penilaian paparan.	Menunjukkan bahwa pencemar kimiawi dapat menimbulkan risiko kronis yang berbeda dari dampak akut kontaminasi mikrobiologis.
2	Amrose et al. (Amrose et al., 2020)	Kontaminasi kimiawi di wilayah dengan keterbatasan sumber daya	Arsenik, fluorida, nitrat, timbal, kromium, total padatan terlarut, serta kontaminan organik menjadi ancaman penting, tetapi pilihan teknologi mitigasi dipengaruhi oleh biaya, energi, dan pengelolaan residu.	Risiko tidak hanya ditentukan oleh kadar pencemar, tetapi juga oleh kelayakan teknologi pengolahan dalam konteks lokal.

No.	Artikel dan tahun	Fokus kajian	Temuan utama	Pola atau perbedaan hasil
3	Lin et al. (Lin et al., 2022)	Pencemaran air dan heterogenitas penyakit	Pencemaran air berhubungan dengan diare dan penyakit lain, sedangkan intervensi peningkatan kualitas air berpotensi menurunkan diare.	Efek intervensi berbeda menurut jenis penyakit, karakteristik populasi, dan kualitas pelaksanaan program.
4	Podgorski dan Berg (Podgorski & Berg, 2022)	Pemetaan global fluorida dalam air tanah	Paparan fluorida geogenik dalam air tanah berpotensi memengaruhi sekitar 180 juta orang dan berkaitan dengan fluorosis gigi serta tulang.	Berbeda dari patogen yang umumnya menghasilkan dampak cepat, fluorida terutama menunjukkan risiko kronis akibat paparan jangka panjang.
5	Wolf et al. (Wolf et al., 2022)	Efektivitas intervensi air, sanitasi, dan cuci tangan	Perbaikan layanan air, sanitasi, dan cuci tangan menurunkan risiko diare pada anak di negara berpendapatan rendah dan menengah.	Konsisten dengan studi intervensi lain, tetapi besarnya manfaat bergantung pada jenis intervensi dan kondisi awal layanan.
6	Wang et al. (Wang et al., 2023)	Hubungan kualitas air tanah dan kesehatan	Zat dalam air tanah dikelompokkan menjadi unsur geogenik, unsur biogenik, kontaminan antropogenik, kontaminan baru, dan patogen yang dapat mencapai manusia melalui berbagai jalur paparan.	Menekankan kompleksitas sumber dan jalur paparan yang tidak dapat dijelaskan melalui satu indikator kualitas air.
7	Levin et al. (Levin et al., 2023)	Profil risiko arsenik, timbal, nitrat, PFAS, uranium, dan produk samping disinfeksi	Kontaminan kimiawi dalam sistem air minum menimbulkan profil paparan yang beragam dan berpotensi menyebabkan dampak kesehatan kronis.	Memperluas fokus kajian dari penyakit infeksi menuju kanker, gangguan metabolik, dan gangguan perkembangan.
8	Darling et al. (Darling et al., 2023)	Kontaminan mikrobiologis dan kimiawi di Appalachia rural	Bukti mengenai kualitas air dan dampak kesehatannya belum memberikan kesimpulan yang jelas karena sebagian besar penelitian bersifat potong lintang dan hanya sedikit menggunakan desain kohort atau kasus-kontrol.	Menunjukkan bahwa keterbatasan desain penelitian dapat menjelaskan perbedaan hasil antarstudi.
9	Waddington et al. (Waddington et al., 2023)	Intervensi WASH dan mortalitas anak	Tinjauan sistematis mengevaluasi pengaruh perbaikan air, sanitasi, dan higiene terhadap mortalitas anak serta variasinya menurut konteks.	Dampak terhadap mortalitas memerlukan evaluasi yang lebih ketat dibandingkan pengukuran diare jangka pendek.

No.	Artikel dan tahun	Fokus kajian	Temuan utama	Pola atau perbedaan hasil
10	Wee dan Aris (Wee & Aris, 2023)	Paparan PFOA dan PFOS melalui air minum	PFOA dan PFOS banyak ditemukan di lingkungan, sementara regulasi dan teknologi pengendaliannya belum seragam antarnegara.	Perbedaan kebijakan, kapasitas pemantauan, dan kemampuan pengolahan menyebabkan variasi risiko antarwilayah.
11	Brunn et al. (Brunn et al., 2023)	Persistensi, bioakumulasi, dan toksisitas PFAS	Paparan PFAS yang berlangsung lama berpotensi berkaitan dengan kanker ginjal atau testis, serta menimbulkan kekhawatiran terhadap paparan melalui ASI.	Menguatkan bukti mengenai konsekuensi kronis dan lintas generasi dari pencemar persisten.
12	Kerr et al. (Kerr et al., 2024)	Filter air rumah tangga dan diare anak	Filter titik penggunaan seperti LifeStraw dikaji sebagai intervensi untuk mengurangi paparan patogen penyebab diare di negara berpendapatan rendah dan menengah.	Intervensi rumah tangga dapat efektif, tetapi manfaatnya bergantung pada penggunaan berkelanjutan dan pemeliharaan alat.
13	Greenwood et al. (Greenwood et al., 2024)	Pemetaan akses air minum aman dan keterbatasan indikator <i>E. coli</i>	Pengukuran tunggal <i>E. coli</i> tidak selalu mencerminkan risiko kesehatan karena kualitas mikrobiologis dapat berubah cepat dan kontaminasi memiliki banyak sumber.	Berbeda dari pendekatan indikator tunggal, kajian ini mendukung kombinasi inspeksi sanitasi, pemantauan risiko, dan data spasial.
14	Jurczynski et al. (Jurczynski et al., 2024)	Arsenik, nitrat, dan fluorida dalam air minum	Kontaminasi kimiawi terutama ditemukan pada sumber air tanah dan lebih banyak dilaporkan di negara berpendapatan rendah, dengan kelompok bayi dan anak sebagai populasi rentan.	Variasi kadar pencemar berkaitan dengan aktivitas industri, limbah pertanian, pembuangan limbah, dan kondisi geologi.
15	Otorkpa et al. (Otorkpa et al., 2024)	Parameter kualitas air di Afrika dan Amerika Serikat	Perbandingan parameter kualitas air menunjukkan bahwa implikasi kesehatan masyarakat bergantung pada konteks geografis dan kapasitas pemantauan.	Perbedaan standar, ketersediaan data, dan kemampuan kelembagaan membatasi komparabilitas antarnegara.
16	Bain et al. (Bain et al., 2021)	Pemantauan kualitas air pada survei rumah tangga	Kontaminasi <i>E. coli</i> di titik penggunaan lebih sering ditemukan pada rumah tangga miskin, wilayah perdesaan, komunitas dengan kepemilikan ternak, dan musim basah.	Menunjukkan bahwa kondisi sosial ekonomi, lokasi, sanitasi, dan musim berperan sebagai pengubah risiko.
17	Chirgwin et al. (Chirgwin et al., 2021)	Peta bukti efektivitas intervensi WASH	Literatur masih membutuhkan evaluasi mengenai keberlanjutan, kegagalan pemanfaatan, fasilitas kesehatan, kelompok rentan, dan penyandang disabilitas.	Perbedaan efektivitas tidak hanya berasal dari teknologi, tetapi juga dari implementasi dan penerimaan pengguna.

No.	Artikel dan tahun	Fokus kajian	Temuan utama	Pola atau perbedaan hasil
18	Tsang et al. (Tsang et al., 2026)	Paparan PFAS dan kesehatan manusia	Air minum dipandang sebagai salah satu jalur penting paparan PFAS, dengan kemungkinan hubungan terhadap dampak neonatal, sindrom metabolik, gangguan tiroid, dan kanker.	Hubungan epidemiologis telah dilaporkan, tetapi mekanisme kausal dan kontribusi paparan lain masih belum sepenuhnya pasti.
19	Shen et al. (Shen et al., 2026)	Tinjauan payung mengenai air minum tidak aman dan kesehatan	Sintesis berbagai tinjauan menunjukkan hubungan air tidak aman dengan penyakit infeksi, kanker, penyakit kardiovaskular, serta luaran kesehatan ibu dan anak, sementara bukti intervensi dinilai lebih kuat daripada estimasi atribusi risiko.	Menggambarkan kesenjangan antara kepastian mengenai manfaat intervensi dan ketidakpastian dalam mengukur kontribusi pencemar tertentu.
20	Pradana et al. (Tuba et al., 2024)	Intervensi WASH, infeksi patogen, dan status gizi anak	Tinjauan terhadap uji acak terkontrol menilai efektivitas kombinasi intervensi air, sanitasi, higiene, dan nutrisi terhadap infeksi patogen serta status gizi anak.	Hasilnya mendukung pendekatan terpadu karena kualitas air berinteraksi dengan higiene, sanitasi, dan kondisi gizi.

Secara komparatif, dua pola utama tampak konsisten dalam literatur. Pertama, kontaminasi mikrobiologis, khususnya yang berkaitan dengan patogen fekal, paling sering dikaitkan dengan morbiditas akut seperti diare pada anak. Risiko tersebut meningkat pada rumah tangga miskin, wilayah perdesaan, musim basah, serta lokasi dengan sanitasi dan pengawasan terbatas (Bain et al., 2021). Namun, hubungan antara indikator bakteriologis dan luaran kesehatan tidak selalu konsisten karena kualitas air dapat berubah secara temporal, sementara pengukuran *E. coli* tunggal tidak mampu menangkap seluruh variasi patogen, sumber kontaminasi, dan jalur transmisi (Greenwood et al., 2024). Kedua, penelitian yang lebih baru semakin menegaskan pentingnya pencemar kimiawi seperti arsenik, fluorida, nitrat, timbal, dan PFAS yang berpotensi menyebabkan dampak kronis, termasuk fluorosis, gangguan metabolik, gangguan perkembangan, serta kanker (Amrose et al., 2020; Levin et al., 2023; Podgorski & Berg, 2022).

Perbedaan temuan antarpublikasi terutama dipengaruhi oleh variasi desain penelitian, definisi paparan, musim pengambilan sampel, karakteristik sumber air, serta kemampuan pengolahan pada tingkat rumah tangga dan komunitas. Studi potong lintang cenderung mampu menggambarkan distribusi kontaminasi, tetapi memiliki keterbatasan dalam menetapkan hubungan temporal dan kausal, sebagaimana terlihat pada kajian di Appalachia yang belum dapat menarik kesimpulan tegas mengenai dampak kesehatan (Darling et al., 2023). Sebaliknya, tinjauan terhadap intervensi menunjukkan manfaat yang lebih konsisten, meskipun efektivitasnya dipengaruhi oleh kepatuhan, keberlanjutan, pemeliharaan teknologi, penerimaan pengguna, dan kondisi sosial setempat (Chirgwin et al., 2021; Waddington et al., 2023; Wolf et al., 2022). Dengan demikian, perbedaan hasil tidak semata-mata menunjukkan pertentangan bukti, melainkan juga mencerminkan heterogenitas paparan, konteks geografis, kelompok populasi, serta kualitas pelaksanaan intervensi.

Sintesis terhadap 20 artikel tersebut memperlihatkan bahwa penilaian risiko penyakit berbasis air perlu menggunakan kerangka multidimensi. Pemantauan sebaiknya menggabungkan indikator

mikrobiologis dan kimiawi dengan inspeksi sanitasi, data hidrologis, informasi musim, karakteristik sosial ekonomi, serta pengukuran paparan pada titik penggunaan. Pendekatan ini penting karena pengendalian patogen dan pengendalian pencemar kimiawi memerlukan strategi yang berbeda: patogen membutuhkan respons cepat melalui sanitasi, disinfeksi, dan pengolahan rumah tangga, sedangkan pencemar persisten memerlukan pengendalian sumber, pemetaan paparan jangka panjang, regulasi, dan teknologi pengolahan yang layak secara ekonomi (Jurczynski et al., 2024; Wang et al., 2023). Bukti yang tersedia juga mendukung penggabungan intervensi air, sanitasi, higiene, dan nutrisi, terutama pada anak dan kelompok masyarakat yang menghadapi keterbatasan layanan dasar (Kerr et al., 2024; Tuba et al., 2024).

PEMBAHASAN

Meskipun literatur telah mengidentifikasi berbagai risiko kontaminan, terdapat keterbatasan mendasar dalam definisi operasional zat seperti PFAS yang menghambat akurasi estimasi beban pencemaran global. PFAS bukan merupakan satu senyawa tunggal, melainkan kelompok besar senyawa dengan struktur, sifat mobilitas, persistensi, bioakumulasi, dan toksisitas yang beragam. Perubahan definisi tersebut berpengaruh langsung terhadap jumlah senyawa yang dihitung, batas deteksi yang digunakan, serta interpretasi mengenai prevalensi pencemaran (Grunfeld et al., 2024).

Keterbatasan definisi juga terlihat dari perbedaan antara pendekatan berbasis senyawa individual dan pendekatan berbasis kelas. Sebagian penelitian hanya mengukur PFOA dan PFOS karena keduanya memiliki data toksikologi dan metode analisis yang lebih mapan, sedangkan senyawa pengganti, prekursor, dan PFAS rantai pendek sering tidak tercakup dalam survei rutin. Akibatnya, hasil pemantauan dapat memberikan gambaran yang lebih rendah daripada total keberadaan PFAS dalam air, terutama ketika senyawa yang belum teridentifikasi mengalami transformasi menjadi bentuk yang lebih persisten (Grunfeld et al., 2024; Kidd et al., 2022).

Masalah tersebut diperburuk oleh keterbatasan metode analitik yang tersedia. Pemantauan berbasis target umumnya mampu mengukur sejumlah senyawa tertentu dengan sensitivitas tinggi, tetapi tidak dapat menangkap seluruh variasi PFAS yang terdapat dalam sampel. Sebaliknya, metode non-target dan suspect screening memiliki potensi untuk menemukan senyawa yang belum dipantau, tetapi memerlukan pustaka referensi, standar analitik, instrumen, serta kapasitas interpretasi data yang belum tersedia secara merata antarnegara (Grunfeld et al., 2024; Wee & Aris, 2023).

Perbedaan kemampuan laboratorium menyebabkan data PFAS sulit dibandingkan secara langsung. Variasi dalam teknik pengambilan sampel, penyimpanan, preparasi, instrumen, batas kuantifikasi, dan prosedur jaminan mutu dapat menghasilkan perbedaan konsentrasi meskipun sampel berasal dari sumber air yang serupa. Kajian mengenai panduan pengambilan sampel menunjukkan bahwa sejumlah metode yang digunakan hanya mencakup sebagian kecil dari subkelas PFAS, sehingga hasil negatif tidak selalu dapat ditafsirkan sebagai ketiadaan pencemaran (Kidd et al., 2022).

Kesenjangan geografis merupakan keterbatasan lain yang penting. Penelitian PFAS masih lebih banyak dilakukan di negara dengan sistem pemantauan lingkungan dan regulasi yang relatif maju, sedangkan negara berpendapatan rendah dan menengah sering menghadapi keterbatasan pembiayaan, peralatan, tenaga ahli, serta basis data nasional. Literatur terbaru menegaskan bahwa banyak negara belum memiliki mekanisme regulasi dan pemantauan PFAS yang memadai, sehingga perbandingan antara wilayah dengan data lengkap dan wilayah tanpa data berisiko menghasilkan bias geografis (Wee & Aris, 2023).

Data pada tingkat rumah tangga juga belum mencukupi, khususnya bagi masyarakat yang menggunakan sumur pribadi atau sumber air informal. Survei terhadap air keran di Amerika Serikat menunjukkan bahwa PFAS ditemukan baik pada pasokan publik maupun sumur pribadi, sementara informasi mengenai sumber air yang tidak dipantau masih terbatas (Smalling et al., 2023). Kondisi ini penting karena kelompok yang tidak tercakup dalam sistem pengawasan formal dapat mengalami paparan kronis tanpa memperoleh informasi mengenai kualitas air atau pilihan pengolahan yang aman.

Selain keterbatasan cakupan, sebagian besar penelitian masih menilai pencemaran berdasarkan konsentrasi sesaat. Pendekatan tersebut kurang mampu menjelaskan perubahan temporal akibat variasi hidrologi, penggunaan lahan, aktivitas industri, curah hujan, dan efektivitas pengolahan air. Pemantauan berulang dan desain longitudinal diperlukan untuk membedakan kontaminasi yang bersifat sementara dari paparan yang menetap serta untuk mengidentifikasi perubahan profil PFAS setelah penerapan kebijakan pembatasan atau teknologi remediasi (Wee & Aris, 2023).

Penelitian kesehatan juga menghadapi persoalan atribusi paparan. Individu dapat terpapar PFAS melalui air minum, makanan, debu, produk konsumen, dan udara secara bersamaan, sehingga kontribusi khusus air minum sulit dipisahkan. Selain itu, paparan biasanya melibatkan campuran berbagai PFAS dan kontaminan lain, sedangkan banyak penelitian masih menganalisis senyawa secara terpisah. Literatur mengusulkan perlunya penilaian risiko kumulatif yang mempertimbangkan interaksi campuran, bukan hanya membandingkan satu senyawa dengan satu nilai ambang (Brunn et al., 2023; Smalling et al., 2023).

Hubungan antara konsentrasi PFAS dalam air dan dampak kesehatan juga belum sepenuhnya konsisten. Sejumlah tinjauan melaporkan hubungan dengan luaran neonatal, sindrom metabolik, gangguan tiroid, dan kanker, tetapi mekanisme kausal masih belum definitif (Tsang et al., 2026). Keterbatasan tersebut berkaitan dengan variasi durasi paparan, perbedaan waktu paruh senyawa, faktor perancu sosial dan biologis, serta kesulitan menghubungkan pengukuran lingkungan dengan biomarker individu.

Aspek yang belum diteliti secara memadai mencakup kelompok rentan, wilayah pedesaan, komunitas adat, pekerja di sekitar fasilitas industri, serta populasi yang bergantung pada sumur pribadi. Penelitian mendatang perlu menggabungkan pengukuran kualitas air pada sumber dan titik penggunaan dengan biomonitoring, informasi konsumsi air, riwayat tempat tinggal, pola penggunaan produk, dan indikator sosial ekonomi. Pendekatan tersebut dapat memperjelas ketimpangan paparan yang tidak terlihat apabila analisis hanya menggunakan rata-rata konsentrasi regional.

Peluang penelitian berikutnya adalah membangun protokol global yang menyelaraskan definisi PFAS, daftar senyawa prioritas, metode analisis, pelaporan batas deteksi, serta prosedur pengendalian mutu. Harmonisasi ini perlu disertai pengembangan metode yang lebih terjangkau agar pemantauan dapat dilakukan di laboratorium dengan sumber daya terbatas. Basis data terbuka yang memuat lokasi sampling, karakteristik sumber air, metode pengukuran, profil senyawa, dan ketidakpastian hasil juga diperlukan untuk meningkatkan komparabilitas antarwilayah.

Pengembangan sistem pemantauan berbasis non-target screening, pemodelan spasial, dan pembelajaran mesin dapat membantu memperkirakan lokasi pencemaran yang belum terdeteksi. Namun, prediksi tersebut harus divalidasi melalui pengambilan sampel lapangan yang sistematis, terutama di wilayah dengan data historis terbatas. Integrasi data penggunaan lahan, aliran air tanah, aktivitas industri, pola angin, dan karakteristik infrastruktur air berpotensi memperbaiki pemetaan sumber serta jalur transportasi PFAS (Grunfeld et al., 2024; Kurwadkar et al., 2021).

Penelitian intervensi juga perlu diperluas dari sekadar mengukur efisiensi penghilangan menuju evaluasi keberlanjutan dan dampak kesehatan masyarakat. Teknologi pengolahan tertentu mungkin efektif menurunkan konsentrasi PFAS, tetapi menghasilkan limbah terkonsentrasi, membutuhkan biaya operasional tinggi, atau tidak sesuai dengan kapasitas kelembagaan setempat. Oleh karena itu, evaluasi berikutnya perlu memasukkan biaya siklus hidup, kebutuhan energi, pengelolaan residu, penerimaan pengguna, serta kemampuan pemerintah daerah dalam mempertahankan operasi jangka panjang (Wee & Aris, 2023).

Secara metodologis, studi kohort prospektif dan desain panel berulang lebih dibutuhkan dibandingkan penelitian potong lintang semata. Desain tersebut dapat memperbaiki penilaian urutan waktu antara paparan dan luaran kesehatan, sekaligus menangkap perubahan konsentrasi PFAS dan respons biologis dari waktu ke waktu. Penggunaan pendekatan multi-omics, biomarker paparan, dan

analisis campuran juga dapat membantu menjelaskan mekanisme biologis yang belum teridentifikasi secara memadai.

Kesenjangan utama dalam literatur tidak hanya berkaitan dengan kurangnya data mengenai lokasi pencemaran, tetapi juga dengan ketidakkonsistenan mengenai apa yang dimaksud dengan PFAS, bagaimana senyawa tersebut diukur, dan bagaimana dampaknya diatribusikan kepada kesehatan manusia. Perbaikan penelitian memerlukan kolaborasi antara kimia analitik, epidemiologi, toksikologi, hidrologi, ilmu data, kebijakan publik, dan kesehatan lingkungan. Kerangka lintas disiplin tersebut penting agar estimasi beban pencemaran tidak berhenti pada penghitungan konsentrasi, melainkan mampu menjelaskan distribusi paparan, ketimpangan risiko, efektivitas pengendalian, dan konsekuensi kesehatan dalam jangka panjang.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Sintesis literatur menunjukkan bahwa tantangan utama dalam penanganan PFAS terletak pada ketidakseragaman metodologi eksperimental dan data paparan yang terfragmentasi, sehingga menyulitkan penetapan standar regulasi yang komprehensif. Perbedaan definisi PFAS, daftar senyawa yang dianalisis, batas deteksi, strategi pengambilan sampel, serta metode pelaporan menyebabkan hasil pemantauan antarwilayah sulit dibandingkan secara langsung. Selain itu, bukti mengenai dampak kesehatan masih dipengaruhi oleh kompleksitas paparan campuran, variasi durasi dan dosis paparan, serta keterbatasan dalam menghubungkan konsentrasi lingkungan dengan respons biologis. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pencemaran PFAS perlu dipahami sebagai persoalan sistemik yang mencakup sumber pencemar, transportasi lingkungan, paparan manusia, efek toksikologis, dan kapasitas pengendalian.

Secara teoretis, temuan ini memperkuat perlunya pergeseran dari pendekatan berbasis senyawa tunggal menuju kerangka penilaian risiko yang mempertimbangkan PFAS sebagai suatu kelas dan sebagai bagian dari campuran kontaminan. Pemantauan berbasis target perlu dilengkapi dengan non-target screening, bioassay, dan analisis efek gabungan agar karakterisasi pencemaran tidak hanya bergantung pada senyawa yang telah dikenal sebelumnya. Secara praktis, ketidakpastian ilmiah tidak seharusnya menjadi alasan untuk menunda pengendalian, melainkan perlu dikelola melalui standar yang adaptif, prinsip kehati-hatian, transparansi data, dan perlindungan yang konsisten bagi kelompok rentan. Pemilihan teknologi remediasi juga harus mempertimbangkan efisiensi penghilangan, konsumsi energi, biaya, emisi, serta nasib akhir residu karena efektivitas teknis semata belum menjamin keberlanjutan lingkungan dan ekonomi.

Penelitian mendatang perlu memprioritaskan harmonisasi definisi, metode analisis, protokol kendali mutu, dan format basis data agar hasil pemantauan dapat diintegrasikan pada tingkat nasional maupun global. Studi longitudinal yang menggabungkan pemantauan sumber air, pengukuran pada titik penggunaan, biomonitoring, data sosial ekonomi, serta informasi riwayat paparan diperlukan untuk memperjelas distribusi risiko dan hubungan temporal antara paparan dengan luaran kesehatan. Pengembangan model spasial, pembelajaran mesin, dan metode analitik beresolusi tinggi juga perlu disertai validasi lapangan serta pelaporan ketidakpastian secara terbuka. Di samping itu, evaluasi intervensi harus melibatkan analisis siklus hidup, biaya jangka panjang, pengelolaan limbah terkonsentrasi, penerimaan masyarakat, dan kemampuan kelembagaan lokal, sehingga rekomendasi kebijakan yang dihasilkan tidak hanya ilmiah, tetapi juga dapat diterapkan secara adil dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abanyie, S. K., Apea, O. B., Abagale, S. A., Amuah, E. E. Y., & Sunkari, E. D. (2023). Sources and factors influencing groundwater quality and associated health implications: A review. *Emerging Contaminants*, 9(2), 100207. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100207>
- Amrose, S., Cherukumilli, K., & Wright, N. C. (2020). Chemical Contamination of Drinking Water in Resource-Constrained Settings: Global Prevalence and Piloted Mitigation Strategies. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 195–226. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-105152>
- Bain, R., Johnston, R. B., Khan, S. M., Hancioglu, A., & Slaymaker, T. (2021). Monitoring Drinking Water Quality in Nationally Representative Household Surveys in Low- and Middle-Income Countries: Cross-Sectional Analysis of 27 Multiple Indicator Cluster Surveys 2014–2020. *Environmental Health Perspectives*, 129(9), 97010. <https://doi.org/10.1289/ehp8459>
- Bain, R., Johnston, R., & Slaymaker, T. (2020). Drinking water quality and the SDGs. *Npj Clean Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00085-z>
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., & Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
- Chirgwin, H., Cairncross, S., Zehra, D., & Waddington, H. (2021). Interventions promoting uptake of water, sanitation and hygiene (WASH) technologies in low- and middle-income countries: An evidence and gap map of effectiveness studies. *Campbell Systematic Reviews*, 17(4). <https://doi.org/10.1002/cl2.1194>
- Chohan, A., Petaway, H., Rivera-Diaz, V., Day, A., Colaianni, O., & Keramati, M. (2020). Per and polyfluoroalkyl substances scientific literature review: water exposure, impact on human health, and implications for regulatory reform. *Reviews on Environmental Health*, 36(2), 235–259. <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0049>
- Darling, A., Patton, H., Rasheduzzaman, M., Guevara, R., McCray, J., Krometis, L., & Cohen, A. (2023). Microbiological and chemical drinking water contaminants and associated health outcomes in rural Appalachia, USA: A systematic review and meta-analysis. *VTechWorks (Virginia Tech)*, 892, 164036. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164036>
- Greenwood, E. E., Lauber, T. B., Hoogen, J. van den, Dönmez, A., Bain, R., Johnston, R., Crowther, T. W., & Julian, T. R. (2024). Mapping safe drinking water use in low- and middle-income countries. *Science*, 385(6710), 784–790. <https://doi.org/10.1126/science.adh9578>
- Grunfeld, D. A., Gilbert, D., Hou, J., Jones, A. M., Lee, M. J., Kibbey, T. C. G., & O'Carroll, D. M. (2024). Underestimated burden of per- and polyfluoroalkyl substances in global surface waters and groundwaters. *Nature Geoscience*, 17(4), 340–346. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01402-8>
- Jurczynski, Y., Passos, R. S., & Campos, L. C. (2024). A Review of the Most Concerning Chemical Contaminants in Drinking Water for Human Health. *Sustainability*, 16(16), 7107. <https://doi.org/10.3390/su16167107>
- Kerr, M., Cardinale, V., Vito, C. D., & Khanolkar, A. R. (2024). Lifestraw Family water filters in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis to define longer-term public health impact against childhood diarrhoea and inform scale-up. *Journal of Global Health*, 14, 4018. <https://doi.org/10.7189/jogh.14.04018>
- Kidd, J., Fabricatore, E., & Jackson, D. (2022). Current and future federal and state sampling guidance for per- and polyfluoroalkyl substances in environmental matrices. *The Science of The Total Environment*, 836, 155523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155523>
- Kurwadkar, S., Dane, J., Kanel, S. R., Nadagouda, M. N., Cawdrey, R. W., Ambade, B., Struckhoff, G. C., & Wilkin, R. T. (2021). Per- and polyfluoroalkyl substances in water and wastewater: A

- critical review of their global occurrence and distribution. *PubMed Central*, 809, 151003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151003>
- Levin, R., Villanueva, C. M., Beene, D., Craddock, A. L., Donat-Vargas, C., Lewis, J., Martinez-Morata, I., Minovi, D., Nigra, A. E., Olson, E. D., Schaider, L. A., Ward, M. H., & Deziel, N. C. (2023). US drinking water quality: exposure risk profiles for seven legacy and emerging contaminants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 34(1), 3–22. <https://doi.org/10.1038/s41370-023-00597-z>
- Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>
- Otokpa, O. J., Anuniru, C., & Ahmed, S. A. (2024). Drinking water quality parameters in Africa and the United States: Implications for public health. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(8), 2466–2478. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i8.1401>
- Overbo, A., Williams, A. R., Evans, B., Hunter, P., & Bartram, J. (2016). On-plot drinking water supplies and health: A systematic review. *UEA Digital Repository (University of East Anglia)*, 219, 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.04.008>
- Podgorski, J., & Berg, M. (2022). Global analysis and prediction of fluoride in groundwater. *Nature Communications*, 13(1), 4232. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31940-x>
- Shen, L., Wei, Y., Zhou, J., Li, Y., Qiao, L., You, D., Jiang, Y., Jiang, Z., Wei, X., & Ma, X. (2026). Unsafe drinking water and human health: A global umbrella review of disease outcomes, intervention effectiveness, and policy implications. *Cell Reports Medicine*, 7(2), 102588. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2026.102588>
- Smalling, K. L., Romanok, K. M., Bradley, P. M., Morriss, M. C., Gray, J. L., Kanagy, L. K., Gordon, S. E., Williams, B., Breitmeyer, S. E., Jones, D. K., DeCicco, L., Eagles-Smith, C. A., & Wagner, T. (2023). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in United States tapwater: Comparison of underserved private-well and public-supply exposures and associated health implications. *Environment International*, 178, 108033. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108033>
- Tsang, J., Everard, M., & Staddon, C. (2026). “Forever Chemicals in Our Water!”: Prevalence of PFAS in Drinking Water, Associated Health Risks, and Approaches to Regulation. *Wiley Interdisciplinary Reviews Water*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/wat2.70057>
- Tuba, S., Pradana, F. J. P., & Kaizar, H. A. (2024). Effectiveness of water, sanitation, hygiene, and nutritional interventions to reduce pathogenic infections and improve nutritional status in children: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trial. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, 14(12), 1193–1215. <https://doi.org/10.2166/washdev.2024.203>
- Waddington, H., Masset, E., Bick, S., & Cairncross, S. (2023). Impact on childhood mortality of interventions to improve drinking water, sanitation, and hygiene (WASH) to households: Systematic review and meta-analysis. *PLoS Medicine*, 20(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1004215>
- Wang, Y., Yuan, S., Shi, J., Ma, T., Xie, X., Deng, Y., Du, Y., Gan, Y., Guo, Z., Dong, Y., Zheng, C., & Jiang, G. (2023). Groundwater Quality and Health: Making the Invisible Visible. *Environmental Science & Technology*, 57(13), 5125–5136. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08061>
- Wee, S. Y., & Aris, A. Z. (2023). Revisiting the “forever chemicals”, PFOA and PFOS exposure in drinking water. *Npj Clean Water*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00274-6>
- Wolf, J., Hubbard, S., Bräuer, M., Ambelu, A., Arnold, B. F., Bain, R., Bauza, V., Brown, J., Caruso, B. A., Clasen, T., Colford, J. M., Freeman, M. C., Gordon, B., Johnston, R. B., Mertens, A., Prüss-Üstün, A., Ross, I., Stanaway, J. D., Zhao, J. T., ... Boisson, S. (2022). Effectiveness of

interventions to improve drinking water, sanitation, and handwashing with soap on risk of diarrhoeal disease in children in low-income and middle-income settings: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet*, 400(10345), 48–59. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(22\)00937-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(22)00937-0)

Xie, X., Shi, J., Pi, K., Deng, Y., Yan, B., Tong, L., Yao, L.-L., Dong, Y., Li, J., Ma, L., Zheng, C., & Jiang, G. (2023). Groundwater Quality and Public Health. *Annual Review of Environment and Resources*, 48(1), 395–418. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-114701>