

Literatur Review: Dinamika Residu Klorin dan Kualitas Mikrobiologi pada Jaringan Distribusi Air Minum di Indonesia

Wildani Saputri Sihombing, Puti Sri Komala*

Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Koresponden email: putisrikomala@eng.unand.ac.id

Diterima: 3 Juni 2026

Disetujui: 11 Juni 2026

Abstract

Maintaining free residual chlorine (FRC) in drinking water distribution systems (DWDS) is essential for controlling microbial regrowth, yet tropical conditions in Indonesia accelerate chlorine decay and reduce disinfection effectiveness. This literature review employed a narrative-comparative framework to synthesize quantitative evidence on chlorine decay dynamics and microbiological water quality in Indonesian DWDS. A total of 37 studies published between 2010 and 2026 were selected from Google Scholar, Scopus, and Portal Garuda based on predefined inclusion criteria. The review identified a consistent negative correlation between distribution distance and FRC concentration, while tropical temperatures (25–30 °C) significantly accelerated chlorine decay. Wall decay in aging galvanized iron pipes contributed up to 97.1% of total chlorine consumption. When FRC concentrations decreased below 0.20 mg/L, coliform levels increased markedly. Several studies also reported potential Viable but Non-Culturable (VBNC) bacterial survival and the formation of carcinogenic disinfection by-products (DBPs), including THMs and HAAs, due to chlorine overdosing. The review concludes that effective disinfection management in tropical DWDS requires integrated strategies, including booster chlorination, hydraulic optimization, improved pipe materials, and DBP monitoring, supported by field-calibrated decay models.

Keywords: *residual chlorine; chlorine decay; escherichia coli; biofilm; water distribution system; indonesia*

Abstrak

Pemeliharaan free residual chlorine (FRC) dalam sistem distribusi air minum SPAM sangat penting untuk mengendalikan pertumbuhan kembali mikroorganisme, namun kondisi tropis di Indonesia mempercepat peluruhan klorin dan menurunkan efektivitas disinfeksi. Tinjauan literatur ini menggunakan pendekatan naratif-komparatif untuk menyintesis bukti kuantitatif mengenai dinamika peluruhan klorin dan kualitas mikrobiologis air pada SPAM di Indonesia. Sebanyak 37 studi yang dipublikasikan pada periode 2010 – 2026 dipilih dari *Google Scholar*, Scopus, dan Portal Garuda berdasarkan kriteria inklusi yang telah ditetapkan. Tinjauan ini menunjukkan adanya korelasi negatif yang konsisten antara jarak distribusi dan konsentrasi FRC, sementara suhu tropis (25–30 °C) secara signifikan mempercepat peluruhan klorin. Reaksi dinding (wall decay) pada pipa besi galvanis tua berkontribusi hingga 97,1% terhadap total konsumsi klorin. Ketika konsentrasi FRC menurun di bawah 0,20 mg/L, kadar coliform meningkat secara signifikan. Beberapa studi juga melaporkan potensi keberlangsungan bakteri dalam kondisi *Viable but Non-Culturable* (VBNC) serta pembentukan produk samping disinfeksi (*disinfection by-products*/DBPs) yang bersifat karsinogenik, termasuk THMs dan HAAs, akibat overdosis klorin. Tinjauan ini menyimpulkan bahwa pengelolaan disinfeksi yang efektif pada SPAM memerlukan strategi terintegrasi, termasuk *booster chlorination*, optimasi hidraulik, perbaikan material pipa, dan pemantauan DBPs yang didukung oleh model peluruhan yang telah disesuaikan dengan data kondisi lapangan.

Kata Kunci: *residu klorin; peluruhan klorin; escherichia coli; biofilm; jaringan distribusi air minum; indonesia*

1. Pendahuluan

Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) berbasis jaringan perpipaan di Indonesia menghadapi tantangan besar dalam mempertahankan kualitas air biologis hingga ke kran konsumen [1]. Iklim tropis, yang dicirikan oleh suhu air rata-rata 25–30 °C sepanjang tahun, menciptakan kondisi termal yang mempercepat metabolisme bakteri dan pembentukan biofilm di dalam pipa. Kondisi ini jauh lebih ekstrem dibandingkan dengan sistem distribusi di negara beriklim sedang [1], [2]. Situasi tersebut meningkatkan kerentanan sistem terhadap pertumbuhan kembali patogen dan pembentukan koloni biofilm pada dinding

pipa [3][4]. Degradasi integritas fisik pipa distribusi semakin memperparah risiko kontaminasi akibat intrusi eksternal selama proses pengaliran air [5], [6].

Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) di Indonesia mengandalkan klorinasi sebagai metode disinfeksi karena kemampuannya menghasilkan residu protektif di sepanjang jaringan distribusi [1]. Regulasi nasional melalui Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 menetapkan kadar sisa klorin bebas atau *free residual chlorine* (FRC) minimal 0,20 mg/L pada titik pelayanan terjauh [7]. Namun, konsentrasi FRC dalam pipa bersifat dinamis dan berkurang akibat reaksi dengan bahan organik terlarut (*bulk reaction*) serta interaksi dengan material dinding pipa, endapan korosi, dan biofilm (*wall reaction*) [2], [8]. Laju peluruhan disinfektan ini dipengaruhi oleh waktu tinggal air (*water age*), diameter pipa, dan fluktuasi kecepatan aliran [9], [10], [11].

Meskipun kajian peluruhan klorin telah dilakukan di berbagai daerah di Indonesia, publikasi yang ada umumnya bersifat deskriptif, berskala lokal, dan belum terintegrasi secara komprehensif. Umumnya, pada penelitian yang telah dipublikasikan, belum ditemukan kajian yang secara khusus mengintegrasikan: (a) dinamika koefisien peluruhan klorin bulk (kb) dan dinding (kw); (b) respons indikator mikrobiologi, termasuk analisis kritis terhadap fenomena Viable but Non-Culturable (VBNC); serta (c) risiko pembentukan Disinfection By-Products (DBPs) dalam kondisi iklim tropis dan karakteristik infrastruktur pipa di Indonesia. Selain itu, upaya PDAM meningkatkan dosis klorin di hulu guna mencapai target residu di hilir sering kali mengabaikan risiko pembentukan senyawa karsinogenik seperti trihalometana (THM) dan asam haloasetat (HAA) [12], [13], [14], [15]. Artikel ini mengisi kesenjangan tersebut melalui sintesis kritis berskala nasional yang mengulas studi-studi dari jurnal ilmiah bereputasi untuk memetakan arah perbaikan rekayasa SPAM di Indonesia.

2. Metode Tinjauan

Tinjauan ini menerapkan metode *comparative narrative review* (tinjauan naratif-komparatif) yang disusun dengan menggunakan prosedur pencarian literatur yang sistematis dan terstruktur pada database bereputasi. Pendekatan ini dipilih untuk menyintesis bukti-bukti kuantitatif yang berasal dari artikel jurnal peer-reviewed tanpa melibatkan literatur abu-abu (*grey literature*), seperti tesis atau skripsi, guna menjaga kekuatan pembuktian (*strength of evidence*).

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama: (1) Google Scholar, (2) Scopus, dan (3) Portal Garuda, dengan membatasi rentang publikasi pada tahun 2010–2026. Formula kata kunci pencarian menggunakan operator Boolean sebagai berikut:

- ("residual chlorine" OR "sisa klor bebas" OR "chlorine decay") AND ("drinking water distribution" OR "PDAM" OR "SPAM" OR "jaringan pipa") AND ("Indonesia" OR "tropical")
- ("coliform" OR "Escherichia coli" OR "microbial regrowth") AND ("chlorine" OR "disinfection") AND ("distribution system" OR "pipe network")

Total artikel yang ditemukan sebanyak 187. Pencarian tambahan dilakukan secara manual melalui daftar referensi dari artikel terpilih (*snowballing*) untuk memperoleh studi yang relevan namun tidak terindeks dalam basis data.

Diagram Alur Seleksi Artikel

Gambar 1 menunjukkan proses seleksi literatur yang dilakukan secara sistematis. Dari pencarian awal sebanyak 187 artikel pada basis data Google Scholar, Scopus, dan Portal Garuda, dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak sehingga tersisa 89 artikel. Setelah evaluasi dokumen secara menyeluruh berdasarkan kriteria inklusi/eksklusi, sebanyak 52 artikel dieliminasi. Total 37 artikel jurnal utama terpilih untuk dianalisis secara mendalam.



Gambar 1. Diagram Alur Prosedur Seleksi Artikel

Ekstraksi Data dan Analisis Komparatif

Data yang diekstraksi dari setiap studi meliputi karakteristik sistem distribusi air minum, seperti jenis dan material pipa, pola aliran, jarak distribusi, serta konsentrasi residu klorin bebas (*Free Residual Chlorine/FRC*) pada reservoir dan titik pelayanan. Selain itu, dikumpulkan pula parameter kualitas air yang dilaporkan dalam masing-masing studi, meliputi parameter biologis (*Escherichia coli*, total coliform, dan bakteri heterotrof), parameter fisik (suhu), serta parameter kimia seperti *trihalometana* (THM) dan produk samping desinfeksi (*Disinfection By-Products/DBPs*). Informasi mengenai sumber data, lokasi penelitian, serta temuan utama terkait mekanisme penurunan residu klorin. Pengumpulan data dilakukan secara analitis-komparatif dengan membandingkan perubahan residu klorin bebas pada berbagai karakteristik jaringan distribusi dan kondisi operasional, mengidentifikasi pengaruh material pipa, jarak distribusi, suhu, serta reaksi dinding pipa terhadap peluruhan klorin, serta mengevaluasi hubungan antara residu klorin bebas dengan risiko kontaminasi mikrobiologis maupun pembentukan produk samping desinfeksi. Selain itu, keterbatasan metode kultur konvensional dalam mendeteksi bakteri *Viable But Non-Culturable* (VBNC) turut dibahas secara kritis untuk memberikan interpretasi yang lebih komprehensif terhadap hasil studi yang direview.

Kriteria Inklusi, Eksklusi, dan Penilaian Kualitas Studi

Dari 187 artikel, kemudian dilakukan penyaringan berdasarkan kriteria inklusi meliputi: (1) artikel yang diterbitkan dalam rentang tahun 2010–2026 dalam bahasa Indonesia atau Inggris; (2) objek studi berupa sistem penyediaan air minum (SPAM) atau jaringan distribusi perpipaan air minum, bukan badan air alami maupun penelitian skala laboratorium murni; (3) menyajikan data kuantitatif residu klorin bebas (*Free Residual Chlorine/FRC*) pada reservoir dan/atau titik pelayanan, serta minimal satu parameter kualitas air biologis atau kimia seperti *Escherichia coli*, total coliform, bakteri heterotrof, THM, atau produk samping desinfeksi lainnya; dan (4) berlokasi di Indonesia atau digunakan sebagai referensi internasional pembandingan yang relevan. Kriteria eksklusi mencakup artikel tanpa metodologi pengujian yang jelas, penelitian laboratorium yang tidak merepresentasikan kondisi operasional jaringan distribusi air minum, serta artikel opini, editorial, atau prosiding yang tidak menyajikan data primer.

Tabel 1 merangkum keseluruhan artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi sebagai hasil dari proses identifikasi, penyaringan, dan penilaian kelayakan, yang terdiri atas 30 jurnal internasional bereputasi dan 7 jurnal nasional terakreditasi dari total 37 artikel terpilih. Penilaian kualitas sumber literatur dilakukan berdasarkan dua kategori utama, di mana jurnal internasional bereputasi diprioritaskan karena memenuhi standar indeksasi Scopus (Q1–Q4), menjalani proses *peer-review* yang ketat, dan berskala

internasional, sehingga diberikan bobot evidensi sangat tinggi. Sementara itu, jurnal nasional terakreditasi dipertimbangkan apabila berfokus pada sistem SPAM lokal Indonesia dan terindeks SINTA 1–4 dengan bobot evidensi tinggi.

Tabel 1. Penilaian Kualitas Sumber Literatur yang Direview

Kategori Literatur	Kriteria Kualitas	Jumlah Artikel	Bobot Evidensi
Jurnal Internasional Bereputasi	Terindeks Scopus (Q1–Q4), melalui <i>peer-review</i> ketat, berskala internasional.	30	Sangat Tinggi
Jurnal Nasional Terakreditasi	Terindeks SINTA 1–4, fokus sistem SPAM lokal Indonesia, <i>peer-reviewed</i> .	7	Tinggi
Total Jurnal Ilmiah Terpilih	Memenuhi seluruh kriteria inklusi	37	-

Kajian Teoritis Kinetika Peluruhan Klorin dalam Pipa

Konsentrasi *Free Residual Chlorine* (FRC) di sepanjang jaringan distribusi mengalami penurunan progresif yang dipengaruhi oleh serangkaian faktor fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi. Secara umum, peluruhan klorin dikendalikan oleh dua mekanisme utama, yaitu peluruhan di dalam badan air (*bulk decay*) dan peluruhan di dinding pipa (*wall decay*) [8], [10], [16]. Namun demikian, intensitas peluruhan pada masing-masing mekanisme tersebut sangat dipengaruhi oleh berbagai variabel operasional dan karakteristik jaringan, meliputi: konsentrasi awal klorin saat injeksi, suhu air, pH, kekeruhan, kandungan bahan organik alami (*Natural Organic Matter*/NOM), karakteristik material dan kondisi pipa (usia, jenis bahan, dan tingkat korosi), keberadaan biofilm dan sedimen di dinding pipa, serta pola aliran dan waktu tinggal air di dalam pipa (*hydraulic retention time*/HRT) [9], [33]. Variabel-variabel tersebut tidak bersifat independen, melainkan berinteraksi secara sinergis sehingga pemodelan peluruhan klorin membutuhkan pendekatan yang mampu mengakomodasi kompleksitas tersebut.

Kinetika Peluruhan Bulk (*Bulk Decay*)

Peluruhan *bulk* merupakan proses degradasi klorin yang berlangsung dalam fasa cair akibat reaksi kimia antara klorin dan berbagai senyawa reaktif yang terlarut dalam air. Reaktan utama dalam proses ini adalah bahan organik alami (NOM), senyawa anorganik tereduksi seperti besi (Fe^{2+}) dan mangan (Mn^{2+}), serta senyawa nitrogen-amonia [18], [19]. Reaksi antara klorin dan NOM tidak hanya mengonsumsi klorin secara signifikan, tetapi juga menghasilkan produk samping berbahaya berupa *disinfection by-products* (DBPs), termasuk trihalometan (THM) dan asam haloasetat (HAA) [13], [20].

Penelitian Xu *et al.* [17] melaporkan bahwa biofilm yang terbentuk di dinding pipa turut memberikan kontribusi nyata terhadap peluruhan *bulk* melalui pelepasan senyawa organik ekstraseluler (*extracellular polymeric substances*/EPS) ke dalam badan air, yang selanjutnya bereaksi dengan klorin bebas. Sementara itu, Hua *et al.* [18] menunjukkan bahwa deposit besi (*iron deposits*) pada dinding pipa berperan ganda, selain mengonsumsi klorin secara langsung melalui reaksi redoks, deposit tersebut juga secara tidak langsung mempercepat peluruhan *bulk* dengan melepaskan ion Fe^{2+} ke dalam aliran air. Suhu air merupakan faktor penting lain yang memengaruhi laju peluruhan *bulk*; penelitian Kongbuchakiat *et al.* [10] mendemonstrasikan bahwa kenaikan suhu memperbesar konstanta laju peluruhan secara eksponensial mengikuti hubungan Arrhenius, sehingga jaringan distribusi di kawasan beriklim panas atau pada musim kemarau mengalami degradasi FRC yang jauh lebih cepat.

Model kinetika orde satu merupakan pendekatan yang paling umum dan banyak diadopsi dalam pemodelan peluruhan *bulk* [9] menggunakan Persamaan 1:

$$C_{(t)} = C_0 \cdot e^{(-k_b \cdot t)} \quad \dots (1)$$

Di mana $C_{(t)}$ adalah konsentrasi klorin pada waktu t (mg/L), C_0 adalah konsentrasi klorin awal (mg/L), dan k_b adalah koefisien peluruhan *bulk* (jam^{-1} atau hari^{-1}). Meskipun model orde satu banyak digunakan karena kesederhanaannya, beberapa penelitian menunjukkan bahwa model ini tidak selalu mampu merepresentasikan kondisi aktual pada seluruh rentang konsentrasi. Feng *et al.* [19] mengembangkan model *mixed-order* yang menggabungkan reaksi orde satu dan orde dua untuk mendeskripsikan peluruhan klorin dan pembentukan THM secara simultan dengan akurasi yang lebih tinggi. Sementara itu, Dhanabal dan Chellaiah [9] melakukan kajian komprehensif terhadap berbagai

pendekatan pemodelan, mulai dari model orde pertama, model dua komponen, hingga pendekatan berbasis kecerdasan buatan (*machine learning*), dan menyimpulkan bahwa pemilihan model yang tepat harus mempertimbangkan karakteristik spesifik air baku serta kondisi jaringan distribusi.

Kinetika Peluruhan Dinding (Wall Decay)

Peluruhan dinding merupakan mekanisme konsumsi klorin yang terjadi di permukaan internal dinding pipa melalui dua proses yang berlangsung secara bersamaan, yaitu reaksi kimia antara klorin dengan material pipa yang terkorosi beserta produk-produk korosinya dan konsumsi klorin oleh komunitas mikroorganisme yang membentuk biofilm pada dinding pipa [16], [18]. Mekanisme ini menjadikan peluruhan dinding sangat dipengaruhi oleh material dan kondisi fisik pipa, usia pipa, serta dinamika komunitas biologis pada permukaan pipa.

Li *et al.* [16] mengembangkan model eksponensial laju variabel (*variable rate exponential model*) yang secara eksplisit memperhitungkan pengaruh kerak korosi (*corrosion scale*) dan biofilm terhadap peluruhan klorin di dinding pipa. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kerak korosi pada pipa besi tua bersifat sangat reaktif terhadap klorin, dengan laju konsumsi yang bahkan melampaui kontribusi biofilm pada kondisi tertentu. Chen *et al.* [23] membandingkan karakteristik kualitas air dan ekologi mikroba antara pipa besi cor tua dan baru, dan menemukan bahwa pipa tua dengan kerak korosi yang tebal mengalami peluruhan klorin pada dinding yang lebih tinggi secara signifikan dibandingkan pipa baru, yang berdampak pada risiko kualitas air yang lebih besar di ujung jaringan. Hua *et al.* [18] secara khusus mengkaji peran deposit besi dalam sistem distribusi dan menunjukkan bahwa deposit tersebut tidak hanya mengonsumsi klorin secara langsung di dinding pipa, tetapi juga memengaruhi kinetika pembentukan THM secara transien.

Xu *et al.* [17] menunjukkan secara eksperimental dan melalui pemodelan bahwa biofilm pada dinding pipa merupakan salah satu faktor dominan dalam peluruhan *wall decay*, karena klorin harus berdifusi melalui lapisan EPS biofilm sebelum mencapai sel mikroba aktif di bawahnya. Proses difusi ini menciptakan gradien konsentrasi klorin yang mengakselerasi konsumsi FRC di zona antarmuka air-dinding. Lebih lanjut, Zhou *et al.* [20] menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi mempercepat metabolisme biofilm sehingga meningkatkan laju konsumsi klorin pada dinding pipa. Bai *et al.* [25] menemukan bahwa paparan klorin secara berkelanjutan mendorong adaptasi komunitas biofilm, di mana bakteri yang bertahan cenderung memiliki toleransi yang lebih tinggi terhadap klorin, sehingga koefisien reaksi dinding (k_w) dapat berubah seiring waktu operasional jaringan.

Secara matematis, laju reaksi dinding R_w dinyatakan dengan Persamaan 2:

$$R_w = -k_w \cdot \left(\frac{A}{V}\right) \cdot C \quad \dots (2)$$

Di mana k_w adalah koefisien reaksi dinding (m/hari), D adalah diameter pipa (m), dan $\left(\frac{A}{V}\right)$ adalah rasio luas permukaan kontak terhadap volume internal pipa. Persamaan ini menunjukkan secara matematis bahwa pipa berdiameter lebih kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar, sehingga secara proporsional mempercepat konsumsi FRC melalui dominasi reaksi pada dinding (*wall-dominated decay*). Kondisi ini menjadi sangat relevan pada jaringan distribusi tersier dan sambungan rumah yang umumnya menggunakan pipa berdiameter kecil.

Persamaan Peluruhan Total

Dengan menggabungkan kedua mekanisme, persamaan peluruhan klorin total di dalam sistem pipa dirumuskan melalui Persamaan 3:

$$\frac{dC}{dt} = -k_b \cdot C - k_w \cdot \left(\frac{A}{V}\right) \cdot C \quad \dots (3)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju peluruhan klorin total merupakan fungsi aditif dari peluruhan *bulk* dan peluruhan dinding, di mana keduanya proporsional terhadap konsentrasi klorin sisa. Diameter pipa yang lebih kecil meningkatkan rasio $\frac{A}{V}$ sehingga mengakselerasi peluruhan klorin secara keseluruhan melalui dominasi reaksi dinding.

Dalam praktik di lapangan, nilai k_b dan k_w tidak bersifat konstan, melainkan dipengaruhi oleh berbagai faktor dinamis. Kwio-Tamale dan Onyutha [33] melakukan analisis komprehensif terhadap pengaruh parameter fisik dan kualitas air terhadap peluruhan klorin di jaringan distribusi nyata, dan menyimpulkan bahwa parameter seperti kekeruhan, kandungan organik (diukur sebagai UV_{254}), pH, dan suhu secara bersama-sama menentukan besaran koefisien peluruhan aktual yang hanya dapat ditentukan secara akurat melalui pengujian di lapangan atau laboratorium pada kondisi spesifik jaringan yang diteliti. Kongbuchakiat *et al.* [10] secara khusus menguji pengaruh suhu dan nilai UV_{254} terhadap model peluruhan

klorin, dan menemukan bahwa model yang dikalibrasi dengan mempertimbangkan kedua variabel tersebut memberikan prediksi yang jauh lebih akurat dibandingkan model dengan koefisien konstan. Hal ini mengimplikasikan bahwa dalam studi jaringan distribusi air minum, kalibrasi parameter model secara spesifik pada lokasi tertentu merupakan langkah yang tidak dapat dihindari untuk menghasilkan simulasi yang representatif.

Perbandingan Model Kinetika Peluruhan

Tabel 2 merangkum beberapa model alternatif peluruhan klorin dengan tingkat kompleksitas yang berbeda sebagai bahan perbandingan. Meskipun model orde satu banyak digunakan karena kemudahannya dalam integrasi perangkat lunak seperti EPANET, model ini memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada air dengan variasi konsentrasi Natural Organic Matter (NOM) yang ekstrem, sehingga mendorong pengembangan model-model alternatif yang lebih akurat. Model *second-order* dinilai lebih sesuai untuk air baku dengan kandungan zat organik tinggi, sedangkan model *Parallel First-Order* membagi reaktivitas NOM menjadi dua fraksi, yakni fraksi cepat dan fraksi lambat, sehingga mampu merepresentasikan dinamika peluruhan yang lebih realistis [20]. Selain itu, model *Variable Rate Exponential* (VRE) dikembangkan secara khusus untuk mengakomodasi perubahan reaktivitas dinding pipa seiring waktu akibat akumulasi kerak korosi dan pematangan biofilm [16].

Tabel 2. Perbandingan Karakteristik Model Peluruhan Klorin

Jenis Model	Formulasi Matematis	Kelebihan	Kelemahan
<i>First-Order</i>	$C_{(t)} = C_0 e^{-k_d t}$	Sederhana, parameter sedikit, mudah diintegrasikan dengan pemodelan hidrolis.	Kurang akurat untuk air dengan kandungan NOM tinggi atau fluktuatif.
<i>Second-Order</i>	$\frac{dC}{dt} = -kC^2$	Lebih representatif untuk air baku dengan konsentrasi zat organik tinggi.	Kalibrasi parameter di lapangan lebih rumit.
<i>Parallel First-Order</i>	$C_{(t)} = f C_0 e^{-k_1 t} + (1-f)C_0 e^{-k_2 t}$	Membagi zat organik menjadi fraksi reaktif cepat dan lambat; sangat akurat.	Membutuhkan data karakterisasi fraksi organik yang detail.
<i>Variable Rate Exponential</i> (VRE)	$\frac{dC}{dt} = -k_{w0} e^{\alpha t} \left(\frac{A}{V} \right) C$	Mengakomodasi perubahan reaktivitas dinding akibat akumulasi kerak korosi/biofilm seiring waktu.	Kompleksitas matematis tinggi, sulit diaplikasikan pada jaringan skala kota.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan sintesis dan analisis terhadap 37 artikel jurnal terpilih yang memenuhi kriteria inklusi, mencakup 30 jurnal internasional bereputasi dan 7 jurnal nasional terakreditasi. Pembahasan diorganisasikan ke dalam tiga tema analitis utama yang saling berkaitan: (1) dinamika peluruhan FRC sepanjang jaringan distribusi di Indonesia, (2) korelasi antara residu klorin dan indikator kualitas mikrobiologi air, serta (3) risiko kimia akibat pembentukan produk samping disinfeksi (DBPs). Ketiga tema tersebut dipilih karena secara bersama-sama merepresentasikan spektrum risiko kualitas air minum yang paling relevan dalam konteks pengelolaan SPAM di Indonesia.

Dinamika Peluruhan Klorin Bebas pada Jaringan Distribusi di Indonesia

Analisis komparatif terhadap 37 artikel jurnal terpilih menegaskan bahwa jarak distribusi dan waktu tinggal air merupakan variabel utama yang memengaruhi degradasi FRC di Indonesia. Sebagian besar penelitian menunjukkan pola penurunan FRC yang tajam seiring dengan air bergerak menjauhi instalasi pengolahan, dengan laju peluruhan yang bervariasi tergantung pada material pipa, suhu air, dan kandungan reaktan dalam air baku [22]. Pola ini sepenuhnya konsisten dengan prediksi model kinetika peluruhan gabungan (*bulk* dan *wall decay*) sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya, namun dengan nilai koefisien yang sangat bervariasi antar lokasi yang menggarisbawahi pentingnya kalibrasi lokasi spesifik pada setiap jaringan distribusi.

Di Padang Panjang (DMA 1 & 2 Bukit Surungan), konsentrasi FRC di reservoir tercatat sebesar 0,83 mg/L dan menurun hingga 0,11 mg/L pada titik terjauh (jarak ±3,5 km) [3]. Penurunan ini menunjukkan korelasi negatif yang sangat kuat antara FRC dan jarak distribusi ($R^2 = 0,91$ pada DMA 1 dan $R^2 = 0,88$

pada DMA 2) [3]. Nilai R^2 yang tinggi tersebut mengindikasikan bahwa jarak distribusi yang secara langsung merepresentasikan waktu tinggal air yang merupakan prediktor dominan peluruhan FRC pada jaringan tersebut, lebih tinggi dibandingkan variabel lainnya.

Degradasi FRC yang serupa juga terdapat pada jaringan distribusi IPA Sungai Lulut PDAM Bandarmasih [2]. Berdasarkan hasil pemodelan menggunakan EPANET 2.0, penurunan FRC yang masif dipicu oleh reaksi *bulk* sebesar 45,45% dan reaksi dinding sebesar 54,55% [2]. Data menunjukkan nilai koefisien *bulk* global (k_b) sebesar 0,5536 hari⁻¹ dan koefisien dinding global (k_w) sebesar 0,0014 m/hari [2]. Rasio kontribusi yang relatif seimbang antara *bulk* dan *wall decay* pada kasus Sungai Lulut ini mengindikasikan bahwa kualitas air baku di jaringan tersebut mengandung konsentrasi NOM yang cukup tinggi, sehingga reaksi *bulk* tetap signifikan meskipun material pipa juga berkontribusi besar. Kontribusi relatif dari *wall reaction* bervariasi bergantung pada jenis material dan usia teknis pipa. Pada kasus spesifik di Tembagapura (Papua) yang memanfaatkan jaringan perpipaan industri berbahan besi galvanis (GI) tua, hasil pemodelan menggunakan EPANET 2.0 menunjukkan konstanta peluruhan total rata-rata sebesar 4,48 hari⁻¹ [8], nilai yang jauh melampaui rentang tipikal yang dilaporkan pada jaringan distribusi di negara-negara beriklim sedang. Analisis kontribusi menunjukkan bahwa reaksi dinding mendominasi dengan menyerap hingga 97,1% dari total konsumsi klorin, sedangkan reaksi *bulk* hanya berkontribusi sebesar 2,9% [8]. Dominasi ekstrem reaksi dinding ini dapat dijelaskan oleh kombinasi faktor: diameter pipa yang kecil (rasio $\frac{A}{V}$ besar), kondisi kerak korosi yang tebal pada pipa GI tua, serta lapisan biofilm yang telah matang dan memiliki reaktivitas tinggi terhadap klorin [16], [23]. Temuan ini secara empiris mengonfirmasi relevansi model *Variable Rate Exponential* (VRE) untuk jaringan pipa tua di Indonesia.

Kondisi iklim tropis dengan suhu air berkisar antara 25–30 °C secara signifikan mempercepat reaksi kimia peluruhan FRC di Indonesia. Kenaikan suhu meningkatkan energi kinetik molekul sehingga mempercepat laju oksidasi bahan organik oleh klorin, sekaligus memicu pertumbuhan biofilm di dinding pipa yang mengonsumsi sisa disinfektan tersebut [10], [24]. Kongbuchakiat *et al.* [10] mengkuantifikasi pengaruh suhu terhadap konstanta laju peluruhan menggunakan korelasi Arrhenius, dan menemukan bahwa setiap kenaikan suhu 10 °C meningkatkan laju peluruhan *bulk* secara eksponensial. Dalam konteks Indonesia, kondisi suhu tropis yang konsisten sepanjang tahun berarti akselerasi peluruhan ini bersifat permanen, berbeda dengan negara beriklim sedang yang hanya mengalaminya pada musim panas. Ke *et al.* [25] juga menemukan variasi musiman komunitas mikroba dan parameter lingkungan dalam sistem distribusi, yang berimplikasi bahwa nilai koefisien peluruhan di jaringan tropis perlu dipantau secara berkala dan tidak dapat dianggap konstan sepanjang tahun operasional.

Korelasi Residu Klorin dengan Indikator Mikrobiologi

Hubungan antara konsentrasi FRC dan indikator kualitas mikrobiologi air minum merupakan inti dari pengendalian klorin dalam sistem distribusi. Secara teoritis, klorin bekerja sebagai disinfektan melalui mekanisme oksidasi terhadap komponen selular mikroorganisme, termasuk membran sel, enzim, dan materi genetik. Oleh karena itu, konsentrasi FRC yang memadai di seluruh titik jaringan merupakan prasyarat terjaganya keamanan mikrobiologi di air minum [27]. Namun demikian, hubungan antara FRC dan indikator mikrobiologi di lapangan tidak selalu bersifat linier dan sederhana. Ketika konsentrasi FRC turun di bawah batas minimum regulasi sebesar 0,20 mg/L sesuai Permenkes No. 2 Tahun 2023 [7], kemampuan inaktivasi bakteri hilang sehingga memicu pertumbuhan kembali mikroorganisme (*regrowth*). Korelasi negatif yang moderat hingga kuat terlihat pada fase distribusi air internal rumah sakit, di mana penurunan klorin bebas berjalan secara linier dengan peningkatan total coliform dan *Escherichia coli* [5]. Kurniawan *et al.* [11] mengonfirmasi pola yang sama pada pipa transmisi air minum, dengan korelasi negatif yang signifikan antara jarak distribusi, sebagai proksi waktu tinggal air, dan FRC terhadap pertumbuhan coliform. Kim *et al.* [27] secara khusus menunjukkan bahwa residu disinfektan yang terjaga secara efektif mampu menekan pertumbuhan *Legionella* dalam sistem distribusi air permukaan, sehingga menggarisbawahi peran protektif FRC terhadap patogen oportunistik yang kerap ditemukan di jaringan distribusi dengan waktu tinggal air yang lama.

Namun, anomali dilaporkan dalam studi di Padang Panjang bahwa meskipun konsentrasi FRC terdeteksi di bawah 0,20 mg/L pada titik terjauh, bakteri *E. coli* yang dikultur tidak terdeteksi (0 MPN/100 mL) [3]. Dua argumen ilmiah dapat menjelaskan fenomena ini. *Pertama*, hipotesis fase *Viable But Non-Culturable* (VBNC), di mana paparan klorin pada konsentrasi subletal diduga mendorong sel-sel bakteri memasuki fase VBNC, yaitu suatu kondisi di mana sel tetap hidup dan berpotensi virulen namun tidak dapat dideteksi melalui metode kultur standar. Wang *et al.* [26] menemukan bahwa fenomena ini terjadi pada *E. coli* pasca-disinfeksi klorin, serta pergeseran signifikan antara proporsi sel yang viable secara

fisiologis dan sel yang dapat dikultur (*culturable*), dengan perbedaan yang melebar seiring meningkatnya dosis klorin residual. Penting untuk digarisbawahi bahwa hingga saat ini belum terdapat studi di Indonesia yang secara langsung mengonfirmasi fenomena VBNC pada SPAM menggunakan pendekatan molekuler, sehingga interpretasi anomali ini masih bersifat hipotetis dan memerlukan validasi lebih lanjut. *Kedua*, matriks biofilm (*EPS Shield*), di mana biofilm yang terbentuk pada dinding pipa menghasilkan matriks *Extracellular Polymeric Substances* (EPS) yang bertindak sebagai pelindung fisik bagi patogen dari penetrasi klorin [8], [28]. Kitajima *et al.* [4] mengidentifikasi komunitas mikroba yang kompleks dalam biofilm pada sensor di dalam pipa sistem distribusi, termasuk sejumlah taksa yang berpotensi patogen, yang tetap bertahan meskipun konsentrasi FRC di badan air terdeteksi dalam rentang normal. Puzon *et al.* [28] secara khusus menemukan bahwa keberadaan *Naegleria fowleri*, yaitu amoeba patogen penyebab meningoensefalitis fatal, terdapat di dalam biofilm sistem distribusi air minum yang memenuhi standar residu klorin, Hal ini menegaskan bahwa perlindungan yang diberikan oleh matriks EPS biofilm terhadap klorin tidak dapat diabaikan dalam penilaian risiko.

Risiko Kimia: Pembentukan Disinfection By-Products (DBPs)

Upaya meningkatkan dosis klorin di hulu secara sepihak untuk mempertahankan FRC di hilir menimbulkan konsekuensi berupa terbentuknya DBPs yang bersifat karsinogenik. Di IPA Siwalanpanji (Sidoarjo), pengolahan air baku dengan kandungan NOM tinggi menggunakan dosis klorin tinggi memicu pembentukan *Total Trihalomethane* (TTHM). Model empiris menunjukkan bahwa pembentukan TTHM berkorelasi kuat ($R^2 > 0,85$) dengan konsentrasi TOC, dosis klorin, pH, suhu, dan waktu tinggal air [12], [17], [19]. Korelasi yang kuat ini mengimplikasikan bahwa seluruh variabel tersebut harus dikendalikan secara simultan, bukan hanya dosis klorin semata apabila pembentukan DBPs ingin ditekan secara efektif.

Hua *et al.* [34] dalam kajian komprehensifnya terhadap pengaruh faktor fisikokimia dan mikroba terhadap pembentukan DBPs dalam sistem distribusi menegaskan bahwa waktu tinggal air yang panjang, kondisi yang umum pada jaringan distribusi Indonesia dengan sistem IWS dan titik mati yang banyak, secara konsisten berkorelasi dengan peningkatan konsentrasi THM dan HAA. Hal ini menciptakan paradoks operasional: jaringan dengan waktu tinggal air yang panjang justru membutuhkan dosis klorin yang lebih tinggi untuk mempertahankan FRC, namun dosis yang lebih tinggi pada waktu tinggal air yang panjang menghasilkan akumulasi DBPs yang lebih besar pula [19], [34]. Feng *et al.* [19] mengembangkan model peluruhan *mixed-order* yang mengintegrasikan pembentukan THM secara simultan, dan menunjukkan bahwa pada kondisi waktu tinggal air di atas 24 jam, konsentrasi THM dapat meningkat secara eksponensial bahkan tanpa penambahan dosis klorin di luar kisaran operasional normal.

Meskipun THM dan HAA telah terbukti karsinogenik pada paparan kronis [14], [31] dan WHO menetapkan batas aman TTHM sebesar 0,3 mg/L, regulasi kualitas air minum di Indonesia belum menetapkan baku mutu DBPs secara spesifik [1], [7]. Huda *et al.* [14] dalam studi pada PDAM Surya Sembada Surabaya mendokumentasikan variasi konsentrasi klorin residual yang signifikan antar titik sampling, yang berimplikasi pada variasi paparan DBPs yang tidak merata di antara konsumen yang dilayani oleh jaringan yang sama. Kesenjangan regulasi ini memicu dilema operasional yang nyata: aspek perlindungan mikrobiologi jangka pendek yang terukur dan diatur secara hukum berhadapan langsung dengan aspek keselamatan kimiawi jangka panjang yang hingga saat ini masih berada di luar jangkauan kerangka regulasi nasional.

Analisis Komparatif Lintas Wilayah di Indonesia

Tabel 3 menyajikan perbandingan dinamika klorin bebas dan indikator mikrobiologi dari tujuh studi kasus di berbagai wilayah Indonesia. Data yang disajikan mencakup karakteristik pipa dan aliran, jenis sumber data, nilai FRC di reservoir dan titik terjauh, jarak distribusi maksimum, parameter biologi/kimia, serta temuan utama dari masing-masing studi. Pemilihan studi didasarkan pada kelengkapan data kuantitatif sehingga memungkinkan analisis komparatif yang representatif untuk memetakan pengaruh variasi teknis dan geografis terhadap stabilitas disinfeksi pada sistem distribusi air minum di Indonesia.

Perbandingan data kuantitatif dari beberapa studi kasus di Indonesia yang hanya menampilkan studi representatif dengan data kuantitatif lengkap untuk memetakan pengaruh variasi teknis dan geografis terhadap stabilitas disinfeksi. Secara umum, seluruh studi menunjukkan tren penurunan *Free Residual Chlorine* (FRC) yang konsisten dari reservoir menuju titik terjauh dalam jaringan distribusi. Nilai FRC di reservoir berkisar antara 0,40 hingga 1,20 mg/L, namun menurun drastis di ujung jaringan, bahkan hingga habis sepenuhnya di Nganjuk (0,00 mg/L) dan hampir habis di Tembagapura (0,02 mg/L). Penurunan ini dipicu oleh dua mekanisme utama, yakni *bulk reaction* dan *wall reaction*, di mana *wall reaction* mendominasi pada sistem perpipaan tua seperti di Tembagapura yang mencapai 97,1%. Kondisi ini

berbanding lurus dengan temuan kontaminasi mikrobiologis, di mana wilayah dengan FRC rendah, seperti Nganjuk dan Padang Panjang, mencatat keberadaan *E. coli* dan *coliform* dalam air distribusi.

Tabel 3. Komparatif Dinamika Klorin Bebas dan Indikator Mikrobiologi di Indonesia

No	Wilayah / Studi	Karakteristik Pipa & Aliran	Jenis Sumber Data	FRC Reservoir (mg/L)	FRC Terjauh (mg/L)	Jarak Maks (km)	Parameter Biologi / Kimia	Temuan Utama
1	Padang Panjang (Sumbar)	GI & HDPE, gravitasi	Jurnal Nasional	0,83	0,11	3,5	<i>E. coli</i> , Suhu	<i>E. coli</i> tidak terdeteksi setelah terkultur meskipun FRC < 0,20 mg/L, mengindikasikan keberadaan sel VBNC.
2	Banjarmasin (Kalsel)	PVC & GI, pompa	Jurnal Nasional	0,80	< 0,20	~8,0	sisa klor	Penurunan FRC dipicu oleh bulk reaction (45,45%) dan wall reaction (54,55%); FRC yang tinggi dapat memicu gatal pada kulit.
3	Surabaya Soetomo)	(Dr. Tandon sentral, pipa internal	Jurnal Nasional	0,50	0,20	Internal	Coliform, <i>E. coli</i>	Korelasi negatif moderat antara sisa klorin bebas dan jarak pipa.
4	Surabaya (IPAM KP 3)	Pipa kota, interkoneksi	Jurnal Nasional	0,70	> 0,20	~20	Bakteri heterotrof	FRC berhasil dipertahankan stabil melalui sistem klorinasi adaptif kota Surabaya.
5	Tembagapura (Papua)	GI tua, gravitasi ekstrem	Jurnal Internasional	0,50	0,02	Kompleks	Coliform, <i>E. coli</i>	Reaksi dinding (<i>wall reaction</i>) mendominasi peluruhan klorin sebesar 97,1%.
6	Nganjuk Timur)	(Jawa Pipa tunggal, pedesaan	Jurnal Nasional	0,40	0,00	~8,0	Coliform, <i>E. coli</i>	FRC habis sepenuhnya di ujung jaringan; terjadi kontaminasi bakteri masif.
7	Sidoarjo (Siwalanpanji)	Pengolahan konvensional	Jurnal Nasional	1,20	N/A	Utilitas	TTHM, DBPs	Risiko pembentukan senyawa karsinogenik THM tinggi akibat overdosis klorin.

Di sisi lain, kasus Sidoarjo (Siwalanpanji) menunjukkan permasalahan yang berbeda, yakni risiko pembentukan senyawa karsinogenik trihalomethane (THM) akibat *overdosis* klorin pada sistem pengolahan konvensional dengan FRC reservoir tertinggi sebesar 1,20 mg/L. Sementara itu, Surabaya (IPAM KP 3) menjadi contoh pengelolaan yang lebih baik melalui sistem klorinasi adaptif yang mampu mempertahankan FRC tetap stabil meskipun jarak distribusi mencapai ~20 km. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan pengelolaan klorin tidak hanya ditentukan oleh dosis awal, tetapi juga oleh jenis infrastruktur, panjang jaringan, serta strategi pemantauan yang diterapkan secara konsisten di sepanjang sistem distribusi air minum.

Analisis Gap dan Tantangan Rekayasa SPAM

Meskipun pemahaman teoritis mengenai kinetika peluruhan klorin dan risikonya terhadap kualitas mikrobiologi air minum telah berkembang pesat, terdapat kesenjangan (*gap*) yang signifikan antara pengetahuan ilmiah tersebut dan praktik pengelolaan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) di Indonesia. Kesenjangan ini bersumber dari tiga tantangan rekayasa utama yang saling berkaitan, yaitu karakteristik operasional jaringan yang tidak kontinu, keterbatasan kapasitas kalibrasi model, serta kerangka regulasi yang belum mengakomodasi risiko DBPs secara memadai.

Sistem Aliran Intermiten (*Intermittent Water Supply / IWS*)

Sebagian besar PDAM di Indonesia masih mengoperasikan jaringan distribusi secara intermiten akibat tingginya angka kehilangan air fisik (*Non-Revenue Water/NRW*) dan keterbatasan kapasitas produksi [11], [32]. Kondisi ini berbeda secara fundamental dengan sistem distribusi kontinu (*continuous water supply/CWS*) yang menjadi asumsi dasar mayoritas model peluruhan klorin yang dikembangkan di negara-negara maju. Kumpel dan Nelson [32] dalam kajian globalnya terhadap sistem IWS di 22 negara berkembang menyimpulkan bahwa sistem aliran intermiten secara inheren menciptakan kondisi hidraulik yang tidak stabil dan tidak dapat diprediksi, sehingga menjadikan pengelolaan residu klorin jauh lebih kompleks dibandingkan dengan sistem kontinu.

Pada saat aliran air dihentikan, tekanan di dalam pipa turun hingga mendekati atau di bawah tekanan atmosfer, bahkan berpotensi menciptakan tekanan negatif (*negative pressure*) pada segmen tertentu. Kondisi ini memicu intrusi air tanah yang terkontaminasi melalui titik-titik kebocoran pada pipa, sambungan yang tidak kedap, atau retakan mikro pada dinding pipa [32]. Kontaminan yang masuk bersama air tanah, termasuk senyawa organik, ion logam tereduksi, dan mikroorganisme patogen, langsung bereaksi dengan sisa klorin yang masih tersisa di dalam pipa, sehingga mengonsumsi FRC secara drastis dalam waktu singkat. Fenomena ini diperburuk oleh fakta bahwa selama periode penghentian aliran, klorin yang tersisa terus mengalami peluruhan *bulk* dan *wall decay* tanpa adanya pasokan klorin baru, sehingga konsentrasi FRC di seluruh jaringan menurun secara progresif hingga mencapai nol [9].

Ketika aliran air kembali dijalankan, fluktuasi hidraulik yang terjadi secara tiba-tiba menghasilkan gaya geser (*shear stress*) pada dinding pipa, sehingga melepaskan lapisan biofilm, sedimen [32], dan partikel korosi ke dalam badan air [32]. Pelepasan masif material organik ini secara instan meningkatkan *wall chlorine demand* dan *bulk chlorine demand* secara bersamaan, sehingga klorin yang diinjeksikan di hulu habis dikonsumsi jauh sebelum mencapai titik-titik pelayanan di ujung jaringan. Kurniawan *et al.* [11] mendokumentasikan fenomena serupa pada sistem distribusi di Indonesia, di mana fluktuasi aliran berkorelasi kuat dengan lonjakan konsentrasi coliform pada segmen pipa yang sama. Secara keseluruhan, sistem IWS terbukti meningkatkan variabilitas FRC secara signifikan, mempercepat degradasi material pipa akibat siklus tekanan berulang, serta meningkatkan risiko kontaminasi patogen secara sistemik [9], [32].

Kelemahan Kalibrasi Model Klorin

Aplikasi EPANET yang digunakan oleh sebagian besar PDAM di Indonesia sering menghasilkan prediksi FRC yang tidak akurat karena menggunakan nilai *default* koefisien *kb* dan *kw* tanpa proses kalibrasi lapangan yang memadai [3], [8], [33]. Kwio-Tamale dan Onyutha [33] mendemonstrasikan bahwa nilai *kb* dan *kw* aktual pada jaringan distribusi yang berbeda dapat bervariasi hingga satu hingga dua orde magnitudo, tergantung pada suhu air, kandungan NOM, pH, dan karakteristik permukaan dinding pipa. Hal ini berarti penggunaan nilai koefisien generik tanpa kalibrasi berpotensi menghasilkan prediksi FRC yang menyimpang sangat jauh dari kondisi aktual di lapangan. Dhanabal dan Chellaiah [9] menegaskan bahwa kalibrasi pada lokasi yang spesifik bukan sekadar prosedur opsional, melainkan prasyarat fundamental agar model peluruhan klorin menghasilkan output yang andal untuk pengambilan keputusan operasional.

Karakteristik kerak korosi (*corrosion scale*) pada pipa besi galvanis lokal serta komunitas biofilm yang terbentuk pada kondisi tropis memiliki kinetika peluruhan yang berbeda dari data referensi standar internasional. Li *et al.* [16] menunjukkan bahwa reaktivitas kerak korosi terhadap klorin berubah seiring waktu dan sangat bergantung pada komposisi mineralogi kerak tersebut yang pada gilirannya ditentukan oleh kualitas air baku lokal dan sejarah operasional pipa. Sementara itu, Komala [3] dalam studinya pada jaringan distribusi di Indonesia menemukan bahwa pola spasial residu klorin aktual di lapangan secara konsisten menyimpang dari prediksi model, yang mengindikasikan adanya bias sistematis akibat kegagalan kalibrasi. Kegagalan kalibrasi ini pada akhirnya menyebabkan estimasi kebutuhan dosis klorin di hulu menjadi tidak akurat, terlalu rendah di beberapa segmen sehingga terjadi defisit FRC, atau terlalu tinggi di segmen lain sehingga memperparah risiko pembentukan DBPs [8], [34].

Regulasi DBPs yang Belum Komprehensif

Regulasi kualitas air minum nasional yang termuat dalam Permenkes No. 2 Tahun 2023 [7] belum mewajibkan pemantauan rutin terhadap senyawa DBPs karsinogenik seperti THM dan HAA. Ketidadaan instrumen hukum yang menetapkan batas maksimum dan kewajiban pemantauan DBPs ini menciptakan celah regulasi yang signifikan, di mana pengelola SPAM dapat menerapkan strategi *overdosing* klorin di hulu tanpa kewajiban untuk memantau, apalagi mempertanggungjawabkan kadar senyawa sampingan berbahaya yang terbentuk akibat tindakan tersebut [12], [19].

Celah regulasi ini semakin kritis mengingat temuan terbaru dalam literatur internasional. Gao *et al.* [13] mengidentifikasi mekanisme pembentukan dan transformasi senyawa *kloro-* dan *bromo-benzoquinone* kelas DBPs baru yang bersifat genotoksik dalam sistem distribusi air minum yang terpapar klorin berlebih. Yu *et al.* [15] menggunakan pendekatan *machine learning* untuk memodelkan kejadian dan risiko kesehatan HAA dalam sistem distribusi dan menyimpulkan bahwa konsentrasi HAA berkorelasi kuat dengan konsentrasi klorin residual serta kandungan prekursor organik, dua kondisi yang justru umum dijumpai pada jaringan distribusi di Indonesia. Huang *et al.* [31] lebih lanjut menunjukkan bahwa proses ozonasi yang mendahului klorinasi dapat memodifikasi jalur pembentukan DBPs secara kompleks, sehingga menghasilkan senyawa sampingan yang berbeda dari prediksi model konvensional.

Josopandojo dan Purnomo [12] dalam studi kasus pada IPA Siwalanpanji, Kabupaten Sidoarjo, menemukan bahwa konsentrasi THM mendekati ambang batas regulasi internasional (WHO: 0,3 mg/L), meskipun dosis klorin yang diaplikasikan masih berada dalam rentang operasional normal. Temuan ini mengindikasikan bahwa bahkan tanpa praktik *overdosing* yang ekstrem, jaringan distribusi dengan kandungan NOM tinggi sudah berpotensi menghasilkan DBPs pada tingkat yang berisiko bagi kesehatan. Tanpa kewajiban pemantauan yang diatur secara regulasi, risiko paparan jangka panjang terhadap senyawa-senyawa karsinogenik ini akan terus berlangsung tanpa terdeteksi dalam sistem pemantauan kualitas air minum nasional [34].

Strategi Pengendalian Sisa Klorin pada Jaringan Distribusi Air Minum

Tabel 4 merupakan tiga pendekatan rekayasa yang direkomendasikan untuk mempertahankan konsentrasi FRC dalam rentang aman sesuai dengan ketentuan Permenkes No. 2 Tahun 2023. Pendekatan tersebut meliputi optimasi titik injeksi klorin (*booster chlorination*), manajemen waktu tinggal air, serta pemeliharaan fisik jaringan.

Tabel 4. Strategi Operasional dan Infrastruktur untuk Optimasi Residu Klorin

No	Strategi	Mekanisme Pengendalian	Rekomendasi Teknis
1	<i>Booster Chlorination</i> (Klorinasi Berjenjang)	Pembagian dosis klorin secara bertahap untuk menekan pembentukan DBPs di hulu jaringan	Dosis sedang di outlet reservoir dikombinasikan dengan stasiun injeksi sekunder di titik tengah jaringan; untuk jaringan IPA Sungai Lulut, titik optimal <i>booster</i> berada pada jarak 1.464 m dari injeksi awal
2	Manajemen Waktu tinggal air dan Pemeliharaan Fisik Jaringan	Eliminasi titik mati (<i>dead-end</i>) dan peningkatan kecepatan aliran untuk mencegah akumulasi sedimen dan degradasi klorin	Pembangunan sistem sirkulasi tertutup (<i>looping</i>); kecepatan aliran minimum 0,30 m/s; teknologi <i>ice pigging</i> untuk pembilasan pipa pada jaringan skala kota
3	Transisi Material Pipa secara Bertahap	Penggantian pipa reaktif dengan material non-reaktif untuk menurunkan koefisien reaksi dinding (<i>kw</i>)	Prioritas penggantian pipa GI tua dengan HDPE atau PVC, terutama pipa berdiameter < 100 mm di ujung sistem yang memiliki rasio A/V terbesar

Ketiga strategi tersebut bersifat komplementer dan idealnya diterapkan secara bertahap sesuai prioritas dan ketersediaan anggaran. Penerapan *booster chlorination* merupakan intervensi yang paling cepat direalisasikan karena tidak memerlukan perubahan infrastruktur fisik jaringan secara menyeluruh, melainkan cukup dengan penambahan unit injeksi pada titik strategis yang diidentifikasi melalui simulasi EPANET. Injeksi klorin dosis tunggal yang tinggi di hulu jaringan justru harus dihindari karena terbukti memicu pembentukan DBPs secara masif [35], sehingga skema klorinasi berjenjang menjadi solusi yang

lebih aman. Studi pada jaringan IPA Sungai Lulut menunjukkan bahwa penempatan stasiun *booster* pada jarak 1.464 meter dari titik injeksi awal mampu mempertahankan sisa klorin secara merata hingga ke ujung jaringan [2], sekaligus menekan risiko pertumbuhan *Legionella* dan mikroorganisme patogen lainnya yang berkembang pada zona defisit klorin [30].

Manajemen waktu tinggal air melalui pembangunan sistem *looping* dan pengendalian kecepatan aliran minimum 0,30 m/s bersifat jangka menengah, karena mensyaratkan penyesuaian desain hidraulik pada jaringan yang sudah beroperasi [3], [9]. Eliminasi titik mati (*dead-end*) menjadi prioritas utama karena zona stagnasi terbukti menjadi lokus utama peluruhan klorin yang ekstrem akibat tingginya waktu tinggal air dan minimnya turbulensi yang mendukung transpor massa klorin ke dinding pipa [36]. Teknologi *ice pigging* berpotensi dipertimbangkan untuk diterapkan di kota-kota besar di Indonesia [37], meskipun implementasinya masih memerlukan analisis kelayakan ekonomi dan teknis yang matang sebelum dapat diadopsi secara luas.

Adapun transisi material pipa merupakan strategi jangka panjang yang memberikan dampak paling fundamental, karena secara permanen menurunkan nilai k_w dan mengurangi reaktivitas dinding. Penggantian pipa besi galvanis (GI) tua dengan pipa HDPE atau PVC yang bersifat nonreaktif terbukti menurunkan koefisien reaksi dinding secara drastis [8], [23]. Prioritas penggantian sebaiknya diarahkan pada segmen pipa berdiameter kecil (< 100 mm) di ujung sistem distribusi, karena segmen tersebut memiliki rasio $\frac{A}{V}$ terbesar sehingga paling rentan terhadap *wall-dominated decay* dan berkontribusi paling signifikan terhadap defisit FRC di titik pelayanan [38].

Arah Penelitian Masa Depan (Future Research Directions)

Berdasarkan celah analisis (*gap analysis*) yang telah dipetakan, beberapa topik penelitian ke depan sangat mendesak untuk dikembangkan di Indonesia:

- Penyebaran Gen Resistansi Antibiotik (ARGs): Suhu tropis yang tinggi, dikombinasikan dengan paparan klorin pada konsentrasi subletal, diduga dapat meningkatkan transfer gen resistansi antibiotik secara konjugatif antarbakteri dalam biofilm [38]. Penelitian metagenomik untuk mengidentifikasi keberadaan ARGs pada sistem distribusi air minum tropis perlu segera diinisiasi.
- Pembuktian Molekuler Fase VBNC: Penelitian eksperimental menggunakan teknik qPCR yang dikombinasikan dengan pewarnaan viabilitas (seperti PMA-qPCR) sangat dibutuhkan untuk menunjukkan keberadaan sel bakteri patogen dalam kondisi VBNC pada sistem perpipaan di Indonesia.
- Pemodelan Kualitas Air Multi-Spesies: Pengembangan model peluruhan menggunakan EPANET-MSX (Multi-Species Extension) diperlukan untuk mensimulasikan interaksi dinamis antara peluruhan klorin, pertumbuhan bakteri, dan pembentukan THM secara terintegrasi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur, strategi pengendalian kualitas air minum di Indonesia sebaiknya tidak hanya berfokus pada peningkatan dosis klorin, melainkan juga menerapkan pendekatan terintegrasi melalui optimasi *booster chlorination*, pengurangan waktu tinggal air, pengendalian biofilm, serta rehabilitasi pipa tua yang rentan mengalami *wall decay*. Selain itu, diperlukan penguatan regulasi dan pemantauan terhadap produk samping disinfeksi (DBPs), serta pengembangan penelitian berbasis metode molekuler untuk mengidentifikasi bakteri dalam kondisi *Viable But Non-Culturable* (VBNC). Pendekatan ini diharapkan mampu menyeimbangkan perlindungan terhadap risiko mikrobiologi dan risiko kimia dalam sistem distribusi air minum di Indonesia.

5. Singkatan

ARGs	Antibiotic Resistance Genes
CWS	Continuous Water Supply
DMA	District Metered Area
DWDS	Drinking Water Distribution System
EPANET	Environmental Protection Agency Network Model
GI	Galvanized Iron
IWS	Intermittent Water Supply
MPN	Most Probable Number
NRW	Non-Revenue Water
PMA-qPCR	Propidium Monoazide-quantitative Polymerase Chain Reaction
qPCR	Quantitative Polymerase Chain Reaction

TTHM	Total Trihalomethanes
UV ₂₅₄	Ultraviolet Absorbance at 254 nm
VRE	Variable Rate Exponential

5. Daftar Pustaka

- [1] P. S. Komala, N. T. Dewi, and A. Adetya, "Simulasi sisa klor pada jaringan distribusi wilayah utara Perumda Air Minum Kota Padang," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 4803–4810.
- [2] E. Sofia and R. Riduan, "Evaluasi dan analisis pola sebaran sisa klor bebas pada jaringan distribusi IPA Sungai Lulut PDAM Bandarmasih," *Jukung Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 3, no. 2, pp. 10–24, doi: 10.20527/jukung.v3i2.4023.
- [3] P. S. Komala, "Analisis spasial residu klorin dan total coliform pada area meter terukur (DMA) jaringan distribusi air minum," *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, vol. 16, no. 2, pp. 145–155, doi: 10.21776/ub.pengairan.2022.013.01.07.
- [4] M. Kitajima, J. Hata, S. Matsubara, S. M. Whittle, A. H. Knudson, and T. A. Thomas, "Microbial abundance and community composition in biofilms on in-pipe sensors in a drinking water distribution system," *Science of The Total Environment*, vol. 766, p. 142314, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142314.
- [5] S. Suhariono, "Hubungan Jarak Distribusi Air Bersih terhadap Sisa Klor, Total Coliform, Escherichia coli pada Air Bersih di RSUD Dr. Soetomo," *Jurnal EnviScience*, vol. 7, no. 2, pp. 190–202, doi: 10.30736/jev.v7i2.578.
- [6] Z. Mol, P. Vet, J. H. G. Vreeburg, and W. A. M. Hijnen, "Pressure-induced taste and odour deviations within the high-pressure drinking water distribution system," *Water Res.*, vol. 289, p. 124965, doi: 10.1016/j.watres.2025.124965.
- [7] K. K. R. Indonesia, "Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan," *Sekretariat Negara, Jakarta*. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/246473/permenkes-no-2-tahun-2023>
- [8] A. Susanto, S. Sumarno, B. Pramudono, and D. Dwi, "Analysis of free residual chlorine in drinking water distribution systems in ore processing industry," *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 29, no. 6, pp. 4321–4330, doi: 10.15244/pjoes/120154.
- [9] G. Dhanabal and G. Chellaiah, "Enhancing residual chlorine stability in water distribution systems: Challenges, modeling approaches, and advanced optimization strategies," *Next Chemical Engineering*, vol. 1, p. 100005, doi: 10.1016/j.nxcen.2025.100005.
- [10] P. Kongbuchakiat, S. Techato, K. Whangchai, and P. Srimalee, "Comparison of chlorine decay models under varying temperature and UV254 for water supply," *Results in Engineering*, vol. 28, p. 108043, doi: 10.1016/j.rineng.2025.108043.
- [11] A. Kurniawan, R. S. Ningrum, and S. Siswanto, "Korelasi jarak distribusi dengan degradasi sisa klor aktif dan pertumbuhan coliform pada pipa transmisi air minum," *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 12, no. 3, pp. 185–193.
- [12] B. Josopandojo and A. Purnomo, "Studi kemampuan instalasi pengolahan air untuk meminimalisasi trihalometana (studi kasus IPA Siwalanpanji Kabupaten Sidoarjo)," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, pp. 1–6, doi: 10.12962/j23373539.v9i2.53648.
- [13] X. Gao, Y. Zhang, Z. Wang, L. Zhao, and Q. S. Wu, "Chloro- and bromo-benzoquinone formation and transformation mechanisms in a drinking water-distribution system," *J. Hazard. Mater.*, vol. 461, p. 132692, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.132692.
- [14] M. M. Huda, A. S. Suryandari, and R. D. Kartika, "Analisis pengaruh sisa klor terhadap air distribusi PDAM Surya Sembada IPAM Karang Pilang 3 Kota Surabaya," *Jurnal Teknologi Manajemen Energi Indonesia*, vol. 3, no. 2, pp. 215–220, doi: 10.55606/jtmei.v3i2.3822.
- [15] Y. Yu, L. Wang, X. Zhao, J. Li, and T. Chen, "Exploring the potential of machine learning to understand the occurrence and health risks of haloacetic acids in a drinking water distribution system," *Science of The Total Environment*, vol. 951, p. 175573, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175573.
- [16] Z. Li, Y. Liu, W. Wang, X. Zhang, and H. Cao, "Deciphering chlorine decay influenced by corrosion scale and biofilm from pipe walls in water distribution system: A variable rate exponential model," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 75, p. 107910, doi: 10.1016/j.jwpe.2025.107910.

- [17] J. Xu, X. C. Wang, M. Niu, and R. Chen, "Role of drinking water biofilms on residual chlorine decay and trihalomethane formation: An experimental and modeling study," *Science of The Total Environment*, vol. 642, pp. 516–525, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.363.
- [18] P. Hua, M. Niu, X. C. Wang, J. Xu, and L. Zhang, "Modeling and elucidation the effects of iron deposits on chlorine decay and transient trihalomethane formation in drinking water distribution system," *Water Res.*, vol. 207, p. 117804, doi: 10.1016/j.watres.2021.117804.
- [19] W. Feng, L. Zhang, Q. Zhou, and X. Wang, "The mixed-order chlorine decay model with an analytical solution and corresponding trihalomethane generation model in drinking water," *Environmental Pollution*, vol. 335, p. 122227, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122227
- [20] X. Zhou, T. Zheng, Y. Wang, F. Li, and J. Zhou, "Thermal energy recovery from chlorinated drinking water distribution systems: Effect on chlorine and microbial water and biofilm characteristics," *Environ. Res.*, vol. 187, p. 109655, doi: 10.1016/j.envres.2020.109655.
- [21] D. Hu, Z. Zhang, Y. Li, J. Wang, and L. Liu, "Pipeline sediments and secondary water supply tanks as dominant reservoirs of microbiological risk in drinking water distribution systems," *Environ. Res.*, vol. 291, p. 123551, doi: 10.1016/j.envres.2025.123551.
- [22] B. Liu, Y. Zhao, J. Sun, and X. Li, "Bacterial communities in sediment and bulk water of chlorinated drinking water distribution system," *Environ. Res.*, vol. 267, p. 121611, doi: 10.1016/j.envres.2025.121611.
- [23] Y. Chen, X. Wang, H. Wang, Z. Zhang, and L. Xu, "Comprehensive comparison of water quality risk and microbial ecology between new and old cast iron pipe distribution systems," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 146, pp. 55–66, doi: 10.1016/j.jes.2023.05.020.
- [24] Y. Ke, Q. Zhang, S. Wu, J. Zhou, and Y. Yang, "Seasonal variations of environmental parameters, microbial community and antibiotic resistome in a suburb drinking water distribution system," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 127, pp. 714–725, doi: 10.1016/j.jes.2022.07.001.
- [25] J. H. Bai, L. Zhao, W. Chen, and Y. Liu, "Chlorination drives biofilm adaptation and resistance of bacteria in raw water: Community succession and antibiotic resistance genes," *Water Res.*, vol. 274, p. 126037, doi: 10.1016/j.watres.2026.126037.
- [26] M. Wang, X. Liu, J. Zhang, and H. Wang, "Regrowth of *Escherichia coli* in environmental waters after chlorine disinfection: shifts in viability and culturability," *Environ. Sci. (Camb)*, vol. 8, no. 7, pp. 1423–1430, doi: 10.1039/d1ew00945a.
- [27] T. Kim, J. Park, S. Olson, and B. S. Becker, "Residual disinfectant effectively suppresses *Legionella* species in drinking water distribution systems supplied by surface water in Minnesota, USA," *Science of The Total Environment*, vol. 940, p. 173317, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173317.
- [28] G. J. Puzon, J. S. Moon, and S. B. Wylie, "Naegleria fowleri in drinking water distribution systems," *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*, vol. 16, pp. 22–27, doi: 10.1016/j.coesh.2020.02.003.
- [29] W. Zhao, H. Yang, L. Zhang, Y. Feng, and X. Zhou, "High temperatures promote antibiotic resistance genes conjugative transfer under residual chlorine: Mechanisms and risks," *J. Hazard. Mater.*, vol. 483, p. 136675, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136675.
- [30] T. Nakanishi, K. Yamamoto, H. Itoh, and M. Sugiyama, "Legionella community dynamics in a drinking water distribution system: Impact of residual chlorine depletion," *Science of The Total Environment*, vol. 956, p. 177302, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177302.
- [31] S. Huang, Z. Chen, L. Wang, and Y. Zhang, "Impact of ozonation on disinfection byproducts formation from phenylalanine during chlorination," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 144, pp. 199–211, doi: 10.1016/j.jes.2023.08.030.
- [32] E. Kumpel and K. L. Nelson, "Intermittent water supply: Prevalence, practice, and microbial water quality," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, no. 2, pp. 542–553, doi: 10.1021/acs.est.5b03973.
- [33] J. C. Kwio-Tamale and C. Onyutha, "Influence of physical and water quality parameters on residual chlorine decay in water distribution network," *Heliyon*, vol. 10, no. 10, p. 30892, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e30892.
- [34] H. P. Hua, Y. Zhao, L. M. Wang, and J. G. Li, "Impact of physicochemical and microbial drivers on the formation of disinfection by-products in drinking water distribution systems," *Water Res.*, vol. 273, p. 123001, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e30892.
- [35] T. Zhang, Y. Wang, J. Liu, P. Sun, and X. Li, "Effect of booster disinfection on the prevalence of microbial antibiotic resistance and bacterial community in a simulated drinking water distribution system," *Environmental Pollution*, vol. 343, p. 122902, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122902.

-
- [36] M. Albert, J. Boxall, and S. Husband, "Modelling Bacterial Biomass in a Non-chlorinated Drinking Water Distribution System," *Procedia Eng.*, vol. 186, pp. 127–134, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.218.
- [37] S. Quarini, J. Ainslie, M. Herbert, and T. Edward, "Application of ice pigging to the water industry: Impacts on pipes and bulk water quality," *Water Industry Engineering*, vol. 9, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.eng.2023.09.016.
- [38] P. Zhu, L. Feng, J. Liu, and X. Qi, "Effects of a composite phosphate corrosion inhibitor on corrosion behavior and water quality stability in drinking water distribution systems," *Water Cycle*, vol. 6, pp. 506–515, doi: 10.1016/j.watcyc.2025.05.004.