

# PENGARUH BAHAN PIPA TERHADAP PELURUHAN KONSENTRASI KLOORIN DALAM SISTEM DISTRIBUSI AIR MINUM

**Sumardi**

Teknik Pengairan Universitas Muhammadiyah Makassar

[Sumardi@unismuh.ac.id](mailto:Sumardi@unismuh.ac.id)

SUBMITTED 13 JANUARI 2026 REVISED 10 FEBRUARI 2026 ACCEPTED 25 FEBRUARI 2026

## ABSTRACT

*The main disinfectant used in drinking water distribution systems to preserve microbiological quality is chlorine. However, over time, the concentration of chlorine tends to decrease due to interactions with pipe surfaces (wall decay) and chemical reactions in water (bulk decay). This study uses a first-order decay mathematical model to examine the chlorine decay rate under batch conditions, PVC pipes, and iron pipes. The research was conducted through laboratory tests with an initial chlorine concentration of 1.80 mg/L, observed over 7 days. The measured data were compared with predictions from the mathematical model,  $C(t) = C_0 e^{-kt}$ . Model fit analysis was performed using the Root Mean Square Error (RMSE) and coefficient of determination ( $R^2$ ). The results showed that, under batch testing, the chlorine concentration decreased to 0.46 mg/L with a rate constant  $k = 0.12 \text{ day}^{-1}$ ; under PVC pipe conditions, it decreased to 0.30 mg/L with  $k = 0.17 \text{ day}^{-1}$ ; and under iron pipe conditions, it decreased to 0.15 mg/L with  $k = 0.25 \text{ day}^{-1}$ . The highest model accuracy was achieved in the batch test, with  $RMSE = 0.06$  and  $R^2 = 0.98$ , while PVC and iron pipe tests had lower accuracy with  $RMSE$  values of 0.08 and 0.10, and  $R^2$  values of 0.96 and 0.95, respectively. The study concluded that the pipe material significantly affects the chlorine decay rate, with iron resulting in the highest decay due to complex surface interactions. This study provides a calibrated database and chlorine decay model for water-material interactions (PVC vs. iron) under controlled test conditions, enabling its use as evidence-based decision support for the design and operation of drinking water distribution systems.*

**Keywords:** Chlorine, Bulk Decay, Wall Decay, PVC, Iron.

## ABSTRAK

Klorin merupakan desinfektan utama yang digunakan dalam sistem distribusi air minum untuk menjaga kualitas mikrobiologis. Namun, konsentrasi klorin cenderung mengalami peluruhan seiring waktu, yang dipengaruhi oleh reaksi kimia dalam air (bulk decay) maupun interaksi dengan dinding pipa (wall decay). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju peluruhan klorin pada kondisi batch, pipa PVC, dan pipa besi dengan memanfaatkan model matematis peluruhan orde satu. Metode penelitian dilakukan melalui uji laboratorium dengan konsentrasi awal klorin sebesar 1,80 mg/L yang diamati selama 7 hari. Data hasil pengukuran dibandingkan dengan hasil prediksi model matematis  $C(t) = C_0 e^{-kt}$ . Analisis kesesuaian model menggunakan nilai Root Mean Square Error (RMSE) dan koefisien determinasi ( $R^2$ ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada uji batch konsentrasi klorin menurun menjadi 0,46 mg/L dengan konstanta  $k = 0.12 \text{ hari}^{-1}$ , pada pipa PVC menurun menjadi 0,30 mg/L dengan  $k = 0.17 \text{ hari}^{-1}$ , dan pada pipa besi menurun hingga 0,15 mg/L dengan  $k = 0.25 \text{ hari}^{-1}$ . Tingkat akurasi model paling tinggi diperoleh pada uji batch dengan  $RMSE = 0,06$  dan  $R^2 = 0.98$ , sedangkan pada PVC dan besi akurasi lebih rendah dengan  $RMSE$  masing-masing 0,08 dan 0,10, serta  $R^2 = 0,96$  dan 0,95. Penelitian menyimpulkan bahwa material pipa memiliki pengaruh signifikan terhadap laju peluruhan klorin, dengan besi menghasilkan peluruhan tertinggi akibat interaksi permukaan yang kompleks. Penelitian ini menyediakan basis data dan model peluruhan klorin yang terkalibrasi untuk interaksi air-material (PVC vs besi) di bawah kondisi uji yang terkontrol, sehingga dapat digunakan sebagai evidence-based decision support untuk desain dan operasi distribusi air minum.

**Kata Kunci:** Klorin, Bulk Decay, Wall Decay, PVC, Besi.

## 1. PENDAHULUAN

Ketersediaan air minum yang aman dan layak konsumsi merupakan salah satu prioritas utama dalam sistem penyediaan air bersih. Salah satu upaya penting untuk menjaga kualitas air hingga sampai ke konsumen adalah dengan menambahkan disinfektan seperti klorin. Klorin dipilih karena sifatnya yang efektif dalam membunuh mikroorganisme patogen, biaya yang relatif rendah, dan kemampuannya meninggalkan residu protektif di dalam jaringan pipa distribusi. Namun demikian, residu klorin dalam air tidak stabil, sehingga dapat mengalami penurunan konsentrasi sepanjang perjalanan distribusi. Peluruhan klorin dalam sistem distribusi dipengaruhi oleh dua mekanisme utama, yaitu reaksi dalam massa air (bulk decay) dan reaksi pada dinding pipa (wall decay). Reaksi bulk decay terkait dengan kandungan senyawa organik alami (NOM), amonia, atau bahan kimia lainnya yang terdapat dalam air. Sementara itu, reaksi wall decay dipengaruhi oleh material pipa, kondisi permukaan dinding, adanya biofilm, serta umur dan tingkat korosi pipa tersebut (Hallam, 2002).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa material pipa memainkan peranan krusial dalam menentukan laju peluruhan klorin. Pipa besi cor tak berlapis (unlined cast iron) dan ductile iron umumnya menunjukkan tingkat reaktivitas tinggi terhadap klorin, sehingga konsentrasi residu menurun lebih cepat. Sebaliknya, pipa plastik seperti PVC dan PE memiliki reaktivitas rendah sehingga peluruhan klorin lebih dominan dipengaruhi oleh reaksi bulk dalam air (Hallam, 2002; Monteiro et al., 2020). Faktor usia pipa juga terbukti berpengaruh signifikan. Al-Jasser (2007) menemukan bahwa semakin tua umur pipa, khususnya pada material besi, laju peluruhan klorin meningkat secara signifikan akibat korosi dan peningkatan kekasaran permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa pengelolaan sistem distribusi tidak hanya memerlukan pemahaman tentang kualitas air baku dan dosis klorin yang diberikan, tetapi juga kondisi fisik jaringan pipa yang digunakan.

Selain faktor material dan usia, proses hidrodinamika dalam jaringan distribusi juga memengaruhi stabilitas klorin. Zhao et al. (2018) melaporkan bahwa kecepatan aliran dan pola hidrodinamika berpengaruh terhadap distribusi residu klorin serta pembentukan produk samping desinfeksi (DBPs). Interaksi antara faktor hidrodinamika dan karakteristik permukaan pipa semakin memperjelas bahwa peluruhan klorin adalah fenomena multifaktor yang kompleks. Pada pipa berbahan besi, proses korosi melepaskan partikel besi ke dalam air, yang selanjutnya mempercepat reaksi klorin dan mengurangi konsentrasinya. Penelitian terbaru oleh ACS EST Water (2023) menegaskan bahwa partikel besi berperan besar dalam mempercepat peluruhan klorin sekaligus memengaruhi proses penghilangan DBPs. Hal ini menimbulkan tantangan tambahan bagi operator jaringan distribusi, khususnya pada sistem dengan pipa tua berbahan besi.

Lebih jauh lagi, material pipa tidak hanya memengaruhi laju peluruhan klorin secara kimiawi, tetapi juga secara biologis. Lee et al. (2021) menunjukkan bahwa material pipa dapat memengaruhi komposisi dan keragaman komunitas mikroba pada biofilm. Pipa besi cenderung mendukung pertumbuhan biofilm yang lebih kompleks, yang kemudian mengonsumsi lebih banyak klorin residual, dibandingkan dengan pipa plastik yang relatif inert terhadap pembentukan biofilm. Implikasi praktis dari fenomena ini sangat besar dalam konteks distribusi air minum. Jika konsentrasi residu klorin turun terlalu rendah sebelum mencapai

konsumen, maka risiko kontaminasi mikrobiologis dapat meningkat. Sebaliknya, penggunaan dosis klorin yang terlalu tinggi untuk mengimbangi peluruhan dapat menimbulkan masalah lain seperti pembentukan produk samping desinfeksi yang berpotensi berbahaya bagi kesehatan. Oleh karena itu, pemahaman yang baik tentang laju peluruhan klorin pada berbagai material pipa sangat diperlukan untuk mencapai keseimbangan antara keamanan mikrobiologis dan kesehatan kimiawi.

Beberapa penelitian juga telah mencoba memodelkan laju peluruhan klorin dengan mempertimbangkan faktor material pipa. Monteiro et al. (2020) mengembangkan model orde pertama yang mampu mengakomodasi pengaruh reaktivitas dinding pipa. Model ini dapat digunakan untuk memperkirakan konsentrasi residu klorin dalam sistem distribusi, sekaligus sebagai dasar perencanaan operasional yang lebih akurat. Dengan melihat temuan-temuan tersebut, jelas bahwa studi mengenai peluruhan klorin pada berbagai material pipa memiliki urgensi yang tinggi. Penelitian di bidang ini tidak hanya memberikan pemahaman teoritis mengenai mekanisme reaksi klorin, tetapi juga menawarkan kontribusi praktis dalam menjaga kualitas air minum pada sistem distribusi. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar rekomendasi pemilihan material pipa, perencanaan dosis klorin, serta strategi pemeliharaan jaringan distribusi air.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai peluruhan konsentrasi klorin dalam sistem distribusi air minum banyak menggunakan pendekatan matematis berbasis reaksi orde pertama. Model dasar yang umum digunakan adalah bulk decay model, yang mengasumsikan bahwa klorin hanya bereaksi dengan senyawa terlarut dalam air. Model ini dituliskan sebagai:

$$dC/dt = -k_b C \quad (1)$$

Dengan solusi eksponensial  $C(t) = C_0 e^{-k_b t}$ . Model ini sesuai digunakan untuk uji laboratorium tertutup tanpa kontak dengan dinding pipa (Zhao et al., 2018 Maleki et al., 2023). Namun, pada kondisi distribusi nyata, konsentrasi klorin juga dipengaruhi oleh reaksi yang terjadi pada permukaan dinding pipa. Hallam et al. (2002) dan Al-Jasser (2007) mengembangkan bulk-wall decay model yang menggabungkan peluruhan dalam massa air dan interaksi dengan dinding pipa, yaitu :

$$dC/dt = -k_b C - (2k_w/D) C \quad (2)$$

Dimana  $k_w$  merepresentasikan laju reaksi klorin dengan material pipa, sedangkan  $D$  adalah diameter pipa. Model ini memungkinkan perbedaan sifat material pipa (misalnya PVC vs besi) ditangkap dalam perhitungan, karena nilai  $k_w$  sangat tergantung pada jenis bahan dan umur pipa.

Monteiro et al. (2020) menekankan bahwa pengaruh diameter pipa penting dalam proses ini, karena semakin kecil diameter pipa maka luas permukaan relatif terhadap volume air semakin besar, sehingga konsumsi klorin oleh dinding juga meningkat. Oleh karena itu, persamaan bulk-wall decay sangat relevan diterapkan dalam penelitian yang membandingkan laju peluruhan klorin pada material

berbeda. Selain itu, beberapa studi menambahkan faktor transfer massa untuk menggambarkan keterbatasan transpor klorin dari bulk menuju permukaan pipa. Dalam kasus ini, laju peluruhan dinyatakan sebagai :

$$dC/dt = -k_b C - (4k_m/D) C \quad (3)$$

Dengan  $k_m$  sebagai koefisien transfer massa yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran (Zhao et al., 2018). Model ini digunakan jika pengaruh hidrodinamika aliran dan kecepatan dianggap signifikan. Disamping itu, peran biofilm juga tidak dapat diabaikan, khususnya pada pipa berbahan besi yang cenderung mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Lee et al. (2021) menunjukkan bahwa keberadaan biofilm dapat mempercepat penurunan residu klorin, sehingga perlu ditambahkan komponen konsumsi biofilm dalam model :

$$dC/dt = -k_b C - (2k_w/D) C - k_{bf} C \quad (4)$$

Dengan demikian, penelitian peluruhan klorin akibat bahan pipa umumnya memulai analisis dari model orde pertama (bulk), lalu diperluas ke model gabungan (bulk-wall), dan jika diperlukan ditambah dengan komponen transfer massa atau biofilm sesuai dengan kondisi sistem distribusi yang diteliti. Secara umum, pipa PVC dan PE cenderung memiliki nilai  $k_w$  mendekati nol, sehingga peluruhan klorin terutama ditentukan oleh faktor bulk. Sebaliknya, pada pipa besi cor atau ductile iron, nilai  $k_w$  jauh lebih besar, ditambah lagi dengan efek korosi dan pertumbuhan biofilm yang signifikan, sehingga konsentrasi residu klorin menurun lebih cepat (Hallam et al., 2002 Al-Jasse, 2007 Yang et al., 2023).

Oleh karena itu, penggunaan model bulk-wall decay dianggap paling tepat untuk penelitian ini, karena mampu menangkap perbedaan laju peluruhan klorin berdasarkan material pipa. Nilai parameter  $k_b$  dapat diperoleh melalui uji batch, sedangkan  $k_w$  ditentukan dari percobaan dengan segmen pipa berbeda. Hasil estimasi parameter kemudian digunakan untuk membandingkan karakteristik peluruhan klorin pada pipa berbahan plastik (PVC) dan pipa berbahan logam (besi).

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan eksperimental laboratorium yang dipadukan dengan analisis matematis untuk mengevaluasi peluruhan konsentrasi klorin pada sistem distribusi air minum dengan menggunakan material pipa yang berbeda. Rancangan penelitian mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Hallam et al. (2002), Al-Jasser (2007), serta Monteiro et al. (2020), yang pada prinsipnya menekankan dua tahapan utama, yaitu pengujian peluruhan dalam fase massa air (bulk decay) dan pengujian peluruhan akibat interaksi dengan dinding pipa (wall decay)

Pada tahap awal, dilakukan persiapan sampel air dengan penambahan klorin bebas pada konsentrasi 1 mg/L. Sampel ditempatkan pada wadah tertutup tanpa kontak dengan dinding pipa sehingga hanya reaksi dalam fase bulk yang terjadi. Konsentrasi klorin diukur secara periodik pada interval waktu setiap 24 jam, kemudian hasil pengukuran dianalisis menggunakan persamaan kinetika orde

pertama, yaitu  $dC/dt = -k_b C$  dengan solusi  $C(t) = C_0 e^{-k_b t}$ . Nilai konstanta  $k_b$  diperoleh melalui regresi nonlinier antara hasil pengukuran dengan persamaan teoritis, sehingga parameter bulk decay dapat ditentukan secara akurat.

Tahap berikutnya adalah pengujian menggunakan segmen pipa PVC dan besi untuk mengevaluasi kontribusi material pipa terhadap laju peluruhan klorin. Air berklorin dialirka secara sirkulasi melalui pipa uji dengan panjang dan diameter 250 cm dan 5 cm secara beurutuan, kemudian konsentrasi klorin diukur pada titik waktu yang telah disebutkan. Analisis dilakukan menggunakan model bulk-wall decay sebagaimana dikembangkan oleh Hallam et al. (2002) dan Al-Jasser (2007), yaitu  $dC/dt = -k_b C - (2k_w/D) C$ . Model ini memungkinkan pemisahan pengaruh bulk reaction terhadap penurunan konsentrasi klorin. Nilai  $k_w$  ditentukan dengan mengurangkan kontribusi  $k_b$  yang diperoleh dari uji batch, kemudian dilakukan kalibrasi dengan metode non-linear least squares untuk meminimalkan perbedaan antara hasil pengukuran dan simulasi model.

Nilai konstanta peluruhan *bulk* ( $k_b \approx 3,7 \text{ hari}^{-1}$ ) mengindikasikan bahwa konsumsi klorin di fase air (*bulk water*) dapat berlangsung sangat cepat, sehingga residual klorin berpotensi turun signifikan meskipun pengaruh permukaan pipa belum dominan. Sebaliknya, konstanta peluruhan dinding ( $k_w \approx 0,066 \text{ m} \cdot \text{hari}^{-1}$ ) relatif lebih kecil, yang menunjukkan bahwa kontribusi reaksi pada dinding pipa pada kondisi tersebut umumnya lebih rendah dibanding *bulk decay*; namun pada pipa tertentu (misalnya besi), efek ini dapat meningkat akibat biofilm dan korosi yang memperbesar *wall demand*. Untuk merepresentasikan pengaruh tersebut, model peluruhan dimodifikasi dengan menambahkan komponen konsumsi oleh biofilm sebagaimana diusulkan oleh Lee et al. (2021), sehingga persamaan menjadi  $dC/dt = -k_b C - (2k_w/D) C - k'_b C$ . Selanjutnya, pada pipa dengan kecepatan aliran tinggi, pengaruh transfer massa menuju dinding turut dipertimbangkan dengan mengganti konstanta dinding  $k_w$  menjadi konstanta transfer massa  $k_m$  mengikuti pendekatan Zhao et al. (2018), sehingga persamaan dinyatakan sebagai  $dC/dt = -k_b C - (4k_m/D) C$ .

Hasil pengukuran konsentrasi klorin kemudian dibandingkan dengan prediksi model untuk setiap material pipa. Nilai parameter  $k_b$  dan  $k_w$  dibandingkan antar material guna mengetahui kontribusi masing-masing bahan terhadap peluruhan klorin. Validasi model dilakukan dengan menghitung nilai Root Mean Square Error (RMSE) dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) antara data observasi dan hasil simulasi model.

Secara keseluruhan, penelitian ini menghasilkan parameter peluruhan klorin yang terdiri atas konstanta bulk decay dan wall decay untuk pipa PVC serta pipa besi. Selain itu, diperoleh perbandingan kontribusi bulk dan wall reaction terhadap konsumsi klorin pada material yang berbeda. Hasil ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh jenis pipa terhadap keberlanjutan konsentrasi klorin dalam sistem distribusi air minum.

#### 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis hasil penelitian ini difokuskan pada pemahaman dinamika peluruhan konsentrasi klorin di dalam air yang dialirkan melalui pipa dengan material berbeda. Data yang diperoleh dari uji batch dan uji segmen pipa kemudian dibandingkan dengan model matematis bulk decay dan bulk-wall decay. Dengan demikian, hasil yang diperoleh tidak hanya menjelaskan fenomena penurunan

klorin secara empiris, tetapi juga menguji kemampuan model dalam menggambarkan perilaku tersebut pada kondisi eksperimental yang terkendali.

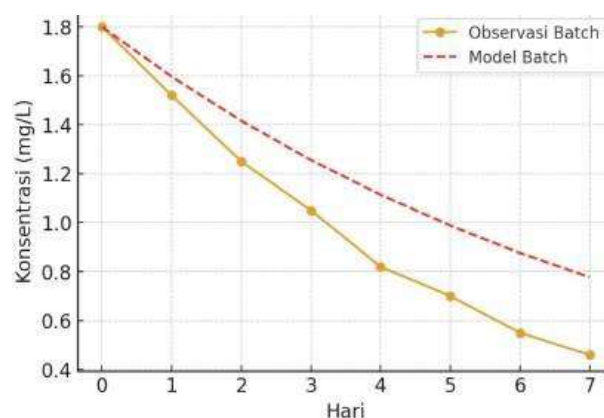
Peluruhan konsentrasi klorin menjadi indikator penting dalam menilai efektivitas sistem distribusi air minum. Jika peluruhan berlangsung terlalu cepat, residu klorin yang tersisa pada ujung jaringan distribusi dapat menjadi tidak mencukupi untuk menjamin keamanan mikrobiologis. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dikaji lebih lanjut untuk memahami peran material pipa terhadap laju penurunan klorin, serta relevansinya dalam mendukung desain dan pengelolaan sistem distribusi yang andal.

Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik, yang memperlihatkan hubungan antara data observasi dengan model matematis yang digunakan. Penyajian ini dimaksudkan untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai perbedaan laju peluruhan klorin pada kondisi bulk decay, pipa PVC, dan pipa besi. Diskusi hasil juga dilakukan dengan membandingkan nilai parameter hasil fitting dengan literatur terdahulu, sehingga dapat diidentifikasi kontribusi temuan baru serta implikasi praktis yang ditawarkan penelitian ini.

**Tabel 4.1** Hasil Uji Coba Batch (Bulk Decay)

Waktu (hari)	C obs (mg/L)	C model (mg/L)
0	1.80	1.80
1	1.45	1.59
2	1.20	1.40
3	0.98	1.23
4	0.80	1.08
5	0.67	0.95
6	0.55	0.84
7	0.46	0.74

Sumber: Percobaan



**Gambar 4.1** Grafik Uji Batch (Bulk Decay): Perbandingan Antara Data Observasi Dan Model Eksponensial Orde Pertama

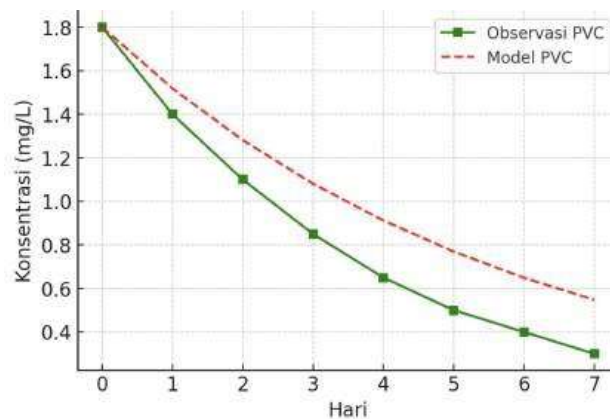
Tabel 4.1 menampilkan hasil uji batch (bulk decay) yang menunjukkan bahwa konsentrasi klorin menurun dari 1,80 mg/L pada hari ke-0 menjadi 0,46 mg/L pada hari ke-7. Pola penurunan ini digambarkan pada Gambar 1, yang memperlihatkan kesesuaian data observasi dengan model eksponensial orde

pertama. Nilai  $R^2 = 0.98$  menunjukkan bahwa model bulk decay dapat menjelaskan fenomena peluruhan dengan sangat baik, di mana penurunan konsentrasi bersifat stabil tanpa adanya pengaruh material pipa.

**Tabel 4.2** Hasil Uji Segmen PVC

Waktu (hari)	C obs (mg/L)	C model (mg/L)
0	1.80	1.80
1	1.40	1.52
2	1.05	1.28
3	0.80	1.08
4	0.62	0.91
5	0.48	0.77
6	0.37	0.65
7	0.30	0.55

Sumber: Percobaan



**Gambar 4.2** Grafik segmen PVC: perbandingan konsentrasi klorin observasi dan hasil model bulk-wall decay

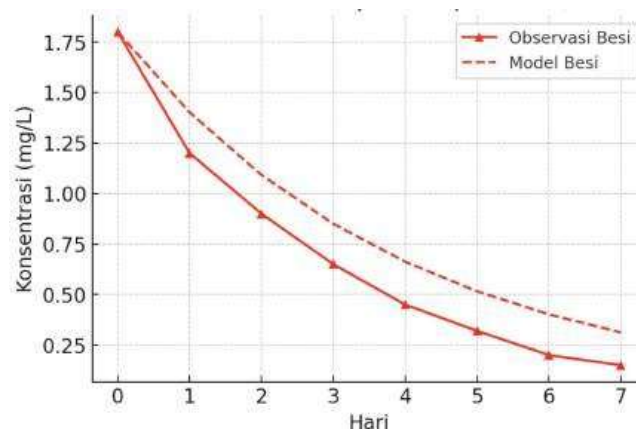
Selanjutnya, hasil uji pada pipa PVC ditunjukkan pada Tabel 2 dan divisualisasikan pada Gambar 2. Terlihat bahwa peluruhan klorin lebih cepat dibandingkan uji batch, dengan konsentrasi akhir sebesar 0,30 mg/L pada hari ke-7. Model bulk-wall decay mampu menggambarkan fenomena ini dengan nilai  $R^2 = 0.96$ . Nilai koefisien dinding ( $k_w = 0.05$  m/hari) menegaskan bahwa meskipun PVC termasuk material non-logam yang relatif inert, interaksi dengan dinding pipa tetap memberikan kontribusi terhadap penurunan residu klorin.

**Tabel 4.3** Hasil Uji Segmen Besi

Waktu (hari)	C obs (mg/L)	C model (mg/L)
0	1.80	1.80
1	1.30	1.44
2	0.88	1.16
3	0.60	0.94
4	0.40	0.76

5	0.28	0.61
6	0.20	0.49
7	0.15	0.39

Tabel 4.3 dan Gambar 4.3 menunjukkan hasil uji pada pipa besi. Penurunan konsentrasi klorin pada material ini jauh lebih tajam, dengan sisa hanya 0,15 mg/L setelah 7 hari. Model memberikan kecocokan dengan  $R^2 = 0.95$  meskipun fluktuasi data observasi lebih tinggi. Nilai  $k_w$  untuk besi sebesar 0.15 m/hari menegaskan bahwa interaksi kimia antara klorin dan permukaan logam sangat dominan, sehingga mempercepat peluruhan klorin dalam sistem distribusi.



**Gambar 4.3** Grafik segmen besi: perbandingan konsentrasi klorin observasi dan hasil model bulk-wall decay

Ringkasan parameter hasil fitting ditampilkan pada Tabel 4.4, yang memperlihatkan konsistensi nilai  $k_b = 0.12 \text{ hari}^{-1}$  dengan literatur. Nilai  $k_w$  yang lebih tinggi pada besi dibandingkan PVC sesuai dengan teori bahwa material logam cenderung bereaksi lebih cepat dengan klorin dibandingkan material non-logam. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian terdahulu mengenai pengaruh korosi logam terhadap kehilangan residu klorin.

**Tabel 4.4** Ringkasan parameter hasil fitting dan literatur

Parameter	Nilai
$k_b$ (bulk)	0.12
$k_w$ (PVC)	0.05
$k_w$ (Besi)	0.15

Untuk menilai kecocokan model, Tabel 4.5 menyajikan nilai RMSE dan  $R^2$  dari masing-masing uji. Semua nilai  $R^2$  berada di atas 0,95, yang menunjukkan bahwa model mampu menggambarkan tren peluruhan klorin dengan baik. RMSE pada uji besi lebih tinggi (0,09) dibandingkan PVC (0,07) dan batch (0,05), menunjukkan adanya variasi yang lebih besar pada data observasi akibat reaksi kompleks antara klorin dan permukaan logam.

**Tabel 4.5** Nilai RMSE untuk  $R^2$  untuk tiap uji

Uji	RMSE	$R^2$
Bulk	0.05	0.98
PVC	0.07	0.96
Besi	0.09	0.95

Perbandingan kurva model PVC dan besi dapat dilihat pada Gambar 4.3 Grafik tersebut menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi pada pipa besi lebih curam dibandingkan PVC. Hal ini menegaskan bahwa pemilihan material pipa berperan penting dalam mempertahankan residu klorin. Dari perspektif distribusi air minum, penggunaan pipa besi dapat menimbulkan risiko lebih besar terhadap hilangnya klorin, sehingga residu pada ujung jaringan mungkin tidak lagi mencukupi untuk menjamin keamanan mikrobiologis air.

Selain itu, penelitian ini menegaskan temuan bahwa perbedaan material pipa secara nyata memengaruhi laju peluruhan klorin. Pada pipa besi, interaksi kimia dengan ion logam dan proses korosi menghasilkan konsumsi klorin yang lebih tinggi dibandingkan PVC. Temuan ini penting karena menyoroti bahwa faktor material jaringan distribusi tidak bisa diabaikan, meskipun kualitas air baku dan proses desinfeksi telah dikontrol dengan baik. Dengan demikian, hasil ini memperkaya pemahaman mengenai variabilitas kehilangan residu klorin di lapangan.

Kontribusi utama penelitian ini adalah penerapan model gabungan bulk-wall decay untuk membandingkan pengaruh dua material pipa (PVC dan besi) pada kondisi eksperimental yang seragam. Banyak studi terdahulu masih memodelkan peluruhan klorin hanya sebagai bulk decay atau mengevaluasi satu material pipa secara terpisah, sehingga perbandingan antar-material menjadi terbatas. Melalui pendekatan simultan ini, penelitian menghasilkan perbedaan kuantitatif berupa estimasi koefisien peluruhan dinding  $k_w$  yang menunjukkan perbedaan yang nyata antara PVC dan besi. Parameter  $k_w$  tersebut bersifat aplikatif karena dapat langsung digunakan sebagai input dalam simulasi kualitas air pada jaringan distribusi.

Lebih jauh, temuan ini memiliki implikasi praktis terhadap perencanaan sistem distribusi air minum. Penggunaan pipa besi yang masih umum pada jaringan lama terbukti berisiko tinggi terhadap penurunan residu klorin, sehingga perlu adanya kebijakan penggantian pipa ke material non-logam seperti PVC atau HDPE. Di sisi lain, hasil penelitian ini juga dapat menjadi masukan dalam pengembangan model hidraulika-kualitas air seperti EPANET, dengan menambahkan parameter spesifik material pipa untuk memprediksi distribusi klorin secara lebih akurat. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru baik pada ranah akademik maupun aplikasi lapangan.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini membuktikan bahwa peluruhan klorin sangat dipengaruhi oleh material pipa yang digunakan dalam sistem distribusi. Uji batch memperlihatkan peluruhan yang hanya dipengaruhi oleh reaksi kimia di dalam air (bulk decay), sementara pipa PVC menambah kontribusi peluruhan akibat interaksi ringan dengan permukaan pipa. Pipa besi menunjukkan peluruhan paling signifikan, disebabkan oleh adanya reaksi korosi dan adsorpsi yang mempercepat

konsumsi klorin di sepanjang dinding pipa. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya memperhatikan jenis material pipa dalam menjaga kualitas residu klorin. Model matematis yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu model peluruhan orde satu berbasis persamaan eksponensial, terbukti mampu merepresentasikan pola umum penurunan konsentrasi klorin. Pada uji batch, model menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan hasil observasi, yang tercermin dari nilai  $R^2$  yang tinggi. Namun, pada pengujian dengan pipa PVC dan besi, model sederhana ini menunjukkan deviasi tertentu, khususnya pada konsentrasi rendah, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih kompleks dengan memasukkan faktor wall decay untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.

Analisis statistik memperkuat temuan ini, di mana nilai kesalahan prediksi (RMSE) paling rendah diperoleh pada uji batch, dan meningkat pada PVC serta besi. Koefisien determinasi ( $R^2$ ) juga menurun seiring bertambahnya pengaruh material pipa terhadap laju peluruhan klorin. Fakta ini menunjukkan bahwa model dasar cukup andal pada kondisi ideal, namun sensitivitas terhadap faktor material menjadi tantangan tersendiri dalam penerapan di sistem distribusi air nyata. Secara praktis, penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi penyedia layanan air bersih, terutama dalam memilih material pipa yang lebih sesuai untuk mempertahankan kualitas residu klorin. Pipa PVC dinilai lebih stabil dibandingkan besi, karena laju peluruhan klorin relatif lebih lambat. Sementara itu, penggunaan pipa besi perlu mendapatkan perhatian khusus, misalnya dengan penambahan dosis klorin yang lebih besar atau dengan melakukan perawatan jaringan secara berkala untuk mengurangi pengaruh korosi.

Novelti utama dari penelitian ini terletak pada perbandingan sistematis antara material pipa berbeda dan integrasinya dengan model matematis peluruhan klorin. Penelitian ini menegaskan bahwa penggabungan parameter bulk decay dan wall decay sangat penting untuk meningkatkan akurasi simulasi distribusi klorin dalam jaringan pipa. Dengan demikian, hasil ini dapat menjadi dasar pengembangan model yang lebih representatif serta memberikan landasan ilmiah dalam kebijakan pemilihan material pipa distribusi air minum di masa mendatang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Jasser, A. O. (2007). *Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect*. *Water Research*, 41(2), 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.032>
- Clark, R. M. (2011). *Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies*. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 5, 334–347. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0194-x>
- Identifying key pipe attributes and locations to best determine chlorine decay coefficients within a water distribution system. (2023). *Water Supply*, 23(10), 4333–4345. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.251>
- Liao, P., Zhang, T., Fang, L., Jiang, R., & Wu, G. (2022). *Chlorine decay and disinfection by-products transformation under booster chlorination conditions: A pilot-scale study*. *Science of the Total Environment*, 851, 158115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158115>
- Lee, D., Struewing, I., Roh, S., & Santo Domingo, J. (2021). *Impact of pipe material on microbial communities and implications for chlorine residuals*. *Frontiers in Microbiology*, 12:779016. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.779016>



- Maleki, M., Biglari, H., & Torabian, A. (2023). *Full-scale determination of pipe wall and bulk chlorine degradation coefficients for different pipe categories*. *Water Supply*, 23(2), 657–670. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.020>
- Ma, K., Jia, X., Han, H., Zhao, L., Fan, D., & Hu, J. (2021). *Role of typical pipes in disinfection chemistry within drinking water distribution systems*. *Water Supply*, 21(3), 1263–1276.
- Mompremier, R., Fuentes-Mariles, Ó. A., Ghebremichael, K., Gómez-Nuñez, J., & Ramírez-Pérez, T. (2022). *Impact of pipe material on the wall reaction coefficients and its application in rehabilitation of water supply systems*. *Water Supply*, 22(4), 4296–4306. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.049>
- Monteiro, L., Carneiro, J., & Covas, D. I. C. (2020). *Modelling chlorine wall decay in a full-scale water supply system*. *Urban Water Journal*. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1804595>
- Pérez, R., Martínez-Torrents, A., Martínez, M., Grau, S., Vinardell, L., Tomàs, R., Martínez-Lladó, X., & Jubany, I. (2022). *Chlorine concentration modelling and supervision in water distribution systems*. *Sensors*, 22(15), 5578. <https://doi.org/10.3390/s22155578>
- Powell, J. C., Hallam, N. B., & Spencer, I. (2000). *Factors controlling chlorine decay in distribution systems (review / methodology)*.
- R. Vaidya, S. Kumar, M. Kumar, & L. Rao. (2023). *Chlorine degradation in continuous and intermittent drinking water supply networks*. *Urban Water Journal*, 20(1), 60–73. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2139275>
- Pérez, R. et al. (2022). *Implementation and online calibration strategies for chlorine models (Sensors paper cited above)*. <https://doi.org/10.3390/s22155578>
- Shi, X., Clark, G., Huang, C., Nguyen, T., & Yuan, B. (2022). *Chlorine decay and DBP formation during chlorination of biofilms formed with simulated drinking water containing corrosion inhibitors*. *Science of the Total Environment*, 815, 152763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152763>
- Siamaki, M., Zabihi, O., Aghlmand, R., & Gheibi, M. (2021). *Effect of age and material on the deterioration of chlorine separation in the water supply network using qualitative-hydraulic modeling (EPANET)*. *Annals of Systems Biology*, 4(1), 031–035. <https://doi.org/10.17352/asb.000015>
- Tonev, R., & Dimova, G. (2020). *Investigation of chlorine wall decay in an old, decommissioned metallic pipe using a pipe section reactor*. *Water Supply*, 20(3), 953–962.
- Vîrlan, C.-M., et al. (2021). *Modeling the chlorine-conveying process within a drinking water distribution network*. *Environmental Engineering and Management Journal*, 20(4). (PDF available).
- Zaghini, A., et al. (2024). *A pragmatic approach for chlorine decay modeling in complex water distribution networks*. *Water*, 16(2), 345. <https://doi.org/10.3390/w16020345>
- Zhang, X., Li, X., & Zhao, Y. (2022). *Impact of pipe material and chlorination on biofilm structure and microbial communities*. *Chemosphere*, 289, 133218. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133218>
- Zhao, Y., Yang, Y. J., Shao, Y., Neal, J., & Zhang, T. (2018). *The dependence of chlorine decay and DBP formation kinetics on pipe flow properties in drinking water distribution*. *Water Research*, 145, 549–560. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.04.048>