ISSN [e]: 2579-4264 | DOI: https://doi.org/10.26760/jrh.V10i3.275-286 November 2026

Difference of Chlorine Dioxide Dosage on Fecal Coliform Reduction in PT. X Domestic Wastewater

Muhammad Fakhri Fathurrahman[1], Ujang Nurjaman[1], Lubis Bambang Purnama[1], Nurul Hidayah[1]

[1]Sanitasi Lingkungan, Jurusan Kesehatan Lingkungan, Poltekkes Kemenkes Bandung, Cimahi, Indonesia

Email: m.fakhrifathurrahman@gmail.com

Received 13 Oktober 2026| Revised 24 Oktober 2026| Accepted 26 Oktober 2026

ABSTRAK

Limbah cair domestik yang mengandung fecal coliform berpotensi mencemari lingkungan dan menimbulkan risiko kesehatan. Pemantauan efluen limbah PT. X menunjukkan kadar fecal coliform 2.419 MPN/100 mL, melebihi baku mutu 1.000 MPN/100 mL. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh perbedaan dosis klorin dioksida terhadap penurunan fecal coliform pada limbah cair domestik PT. X. Klorin dioksida dipilih karena beroksidasi kuat, efektif pada pH luas, dan tidak menghasilkan trihalometana (THM). Sampel diuji dengan variasi dosis 1 mg/L, 2 mg/L, dan 3 mg/L pada waktu kontak 30 menit dengan enam kali pengulangan. Rata-rata penurunan fecal coliform berturut-turut sebesar 18,10%, 35,35%, dan 66,96%. Uji One-Way ANOVA menunjukkan nilai p < 0,001 (p < 0,05), menandakan terdapat pengaruh signifikan dari perbedaan dosis klorin dioksida terhadap penurunan fecal coliform. Disarankan untuk menggunakan dosis klorin dioksida yang lebih tinggi (>3 mg/L) untuk mengoptimalkan penurunan fecal coliform.

***Kata kunci**: klorin dioksida, fecal coliform, disinfeksi, limbah cair domestik*

ABSTRACT

Domestic wastewater containing fecal coliform has the potential to pollute the environment and pose health risks. Effluent monitoring at PT. X showed a fecal coliform level of 2,419 MPN/100 mL, exceeding the quality standard of 1,000 MPN/100 mL. This study aims to determine the effect of different chlorine dioxide dosages on fecal coliform reduction in PT. X domestic wastewater. Chlorine dioxide was selected for its strong oxidizing power, effectiveness across a wide pH range, and non-formation of trihalomethanes (THMs). Samples were tested with dosage variations of 1 mg/L, 2 mg/L, and 3 mg/L at a 30-minute contact time with six replications. The average reductions of fecal coliform were 18.10%, 35.35%, and 66.96%, respectively. One-Way ANOVA test yielded p < 0.001 (p < 0.05), indicating a significant effect of different chlorine dioxide dosages on fecal coliform reduction. Higher chlorine dioxide dosages (>3 mg/L) are recommended to optimize fecal coliform reduction.

***Keywords**: chlorine dioxide, fecal coliform, disinfection, domestic wastewater*

1. PENDAHULUAN

Air merupakan komponen vital bagi kehidupan manusia, namun aktivitas domestik dan industri sering kali memicu pencemaran yang menurunkan kualitasnya. Setiap industri yang melibatkan aktivitas manusia pasti menghasilkan air limbah domestik. Secara umum, limbah domestik dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan sumbernya, yaitu *black water* dan *grey water*. *Black water* adalah limbah yang berasal dari toilet dan mengandung tinja serta urin, sedangkan *grey water* adalah limbah yang berasal dari aktivitas dapur, kamar mandi (selain toilet), dan cucian [1]. Salah satu parameter mikrobiologi penting yang wajib dipenuhi baku mutunya berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 11 Tahun 2025 adalah bakteri *fecal coliform* dengan batas maksimal 1.000 MPN/100 mL. Keberadaan bakteri ini menjadi indikator kontaminasi feses yang berpotensi menyebarkan penyakit saluran pencernaan seperti diare dan disentri, serta merusak ekosistem perairan [2],[3].

PT. X merupakan industri pertahanan di Kota Bandung dengan aktivitas limbah yang murni bersumber dari kegiatan domestik 460 karyawannya. Untuk mengolah limbah sebesar 45 m^3/hari, perusahaan mengoperasikan IPAL yang terdiri dari Bak Sedimentasi I, Bak Anoxic, Bak Aerobik, dan Bak Sedimentasi II yang terintegrasi dengan unit disinfeksi menggunakan klorin tablet. Meskipun infrastruktur telah tersedia, hasil pemantauan berkala dan uji laboratorium menunjukkan kadar *fecal coliform* efluen mencapai 2.419 MPN/100 mL, jauh melampaui baku mutu regulasi terbaru. Hal ini mengindikasikan bahwa proses disinfeksi klorin saat ini tidak efektif. Selain itu, efektivitas klorin konvensional sangat bergantung pada pH (menurun drastis di atas pH 8,5) dan berisiko menghasilkan senyawa trihalometana (THM) yang bersifat karsinogenik ketika bereaksi dengan bahan organik [4].

Upaya penurunan kadar *fecal coliform* pada limbah cair domestik dapat dilakukan salah satunya melalui proses disinfeksi, yaitu tahap pengolahan lanjutan yang bertujuan memusnahkan mikro-organisme patogen seperti virus, bakteri, dan protozoa parasit penyebab penyakit sebelum efluen dibuang ke badan air. Terdapat beberapa metode disinfeksi yang umum digunakan dalam pengolahan air limbah, diantaranya disinfeksi menggunakan sinar ultraviolet (UV), ozonisasi (O_3), serta disinfeksi kimiawi menggunakan senyawa klor seperti klorin gas (Cl_2), kaporit ($Ca(ClO)_2$), dan klorin dioksida (ClO_2) [5]. Klorin dioksida (ClO_2) hadir sebagai alternatif disinfektan yang lebih unggul karena efektivitasnya stabil pada rentang pH yang luas (3,0–9,0) [6] dan tidak membentuk produk sampingan THM [7]. Beberapa studi terdahulu membuktikan ketangguhan senyawa ini. Penelitian Akhlaghi dkk. [8] menemukan bahwa ClO_2 dengan dosis 1,5 mg/L mampu menurunkan *fecal coliform* pada limbah susu hingga 0 MPN/100 mL, jauh lebih efisien dibanding klorin konvensional. Penelitian Ma dkk. [9] melaporkan penurunan bakteri *E. coli* dan *Klebsiella pneumoniae* sebesar >99,9% pada dosis 5 mg/L dengan waktu kontak 10 menit. Meskipun efektivitasnya diakui secara global, kajian mengenai aplikasi ClO_2 khusus untuk inaktivasi *fecal coliform* pada limbah cair domestik di Indonesia masih sangat terbatas.

Berdasarkan kesenjangan literatur dan urgensi pemenuhan baku mutu tersebut, penelitian ini dilakukan dengan menguji variasi dosis ClO_2 sebesar 1 mg/L, 2 mg/L, dan 3 mg/L. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis perbedaan pengaruh variasi dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan kadar *fecal coliform* pada limbah cair domestik PT. X, menghitung persentase penurunannya, serta menentukan dosis paling efektif yang mampu memenuhi regulasi lingkungan yang berlaku.

2. METODOLOGI

2.1 Metode Penelitian

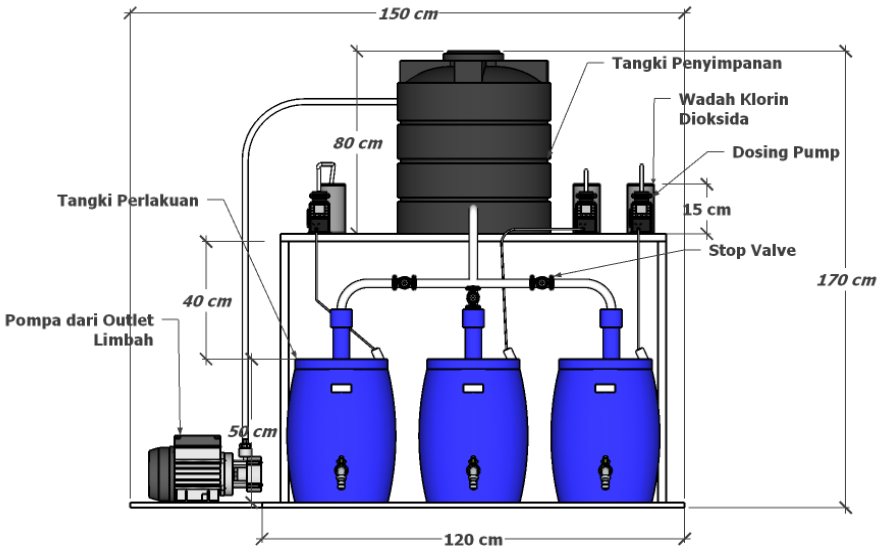
Penelitian ini menggunakan jenis *experimental* dengan desain *One Group Pretest – Posttest Design*. Jenis dan desain penelitian ini dipilih karena penelitian ini akan mengukur apakah terdapat pengaruh dari perlakuan (*treatment*) terhadap subjek penelitian. Pelaksanaan penelitian diawali *pretest* untuk setiap sampel pengujian sebelum perlakuan untuk mengetahui keadaan awal subjek. Selanjutnya perlakuan akan diberikan kepada sampel, sampel tersebut akan dievaluasi lewat *posttest* untuk mengetahui dampak dari perlakuan [10]. Waktu kontak dikunci pada 30 menit. Penelitian ini tidak menyediakan kelompok kontrol abiotik/tanpa disinfektan untuk mengukur peluruhan alami bakteri selama durasi 30 menit tersebut.

Data yang diperlukan pada penelitian ini terbagi menjadi dua yakni data primer dan data sekunder. Data primer tersebut diperoleh langsung oleh peneliti meliputi data hasil pengukuran *fecal coliform*, pH, suhu, volume sampel. Sedangkan, data sekunder yang diperoleh dari sumber lain seperti sumber tertulis dan penulusuran pustaka berupa meliputi gambaran umum PT. X, data hasil pemeriksaan bulanan, literatur dan referensi ilmiah terkait *fecal coliform* dan klorin dioksida (ClO_2).

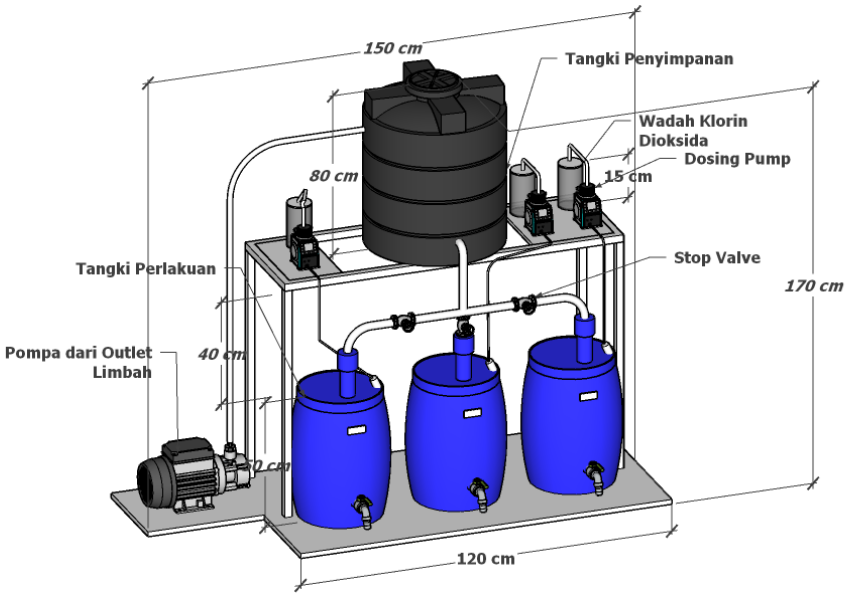
Sampel terlebih dahulu dipindahkan ke tangki penampungan dari outlet IPAL domestik PT. X agar homogen sebelum sampel limbah cair diambil dengan menggunakan teknik *grab sampling* atau pengambilan sampel sesaat dalam satu periode pada titik yang sama.

2.2 Rancangan Alat

Penelitian ini menggunakan seperangkat alat yang dirancang untuk memastikan pengujian dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan *fecal coliform* pada sampel limbah cair dapat dilakukan secara terukur, konsisten, dan terkontrol. Alat yang digunakan terdiri dari dua komponen utama, yaitu tangki penyimpanan yang terhubung ke 3 tangki pengujian dan sistem *dosing pump* untuk dosis klorin dioksida (ClO_2). Desain alat dapat dilihat pada Gambar 1. dan Gambar 2.:



Gambar 1. Desain Alat Tampak Depan



Gambar 2. Desain Alat Tampak Samping Atas

2.3 Tahap Persiapan

Pembuatan alat diawali dengan menyiapkan seluruh alat dan bahan yang terdiri atas satu tangki berkapasitas 120 liter, tiga tangki berkapasitas 60 liter, pipa, kran, besi *hollow*, *dosing pump*, pompa air, dan wadah larutan klorin dioksida. Besi dipotong sesuai ukuran yang telah direncanakan kemudian dirakit menjadi kerangka penyangga. Selanjutnya, tangki dilubangi pada bagian bawah untuk pemasangan kran sebagai saluran pengeluaran air. Pipa dipotong sesuai kebutuhan dan dipasang untuk menghubungkan tangki penyimpanan dengan masing-masing tangki perlakuan. *Dosing pump* beserta wadah larutan klorin dioksida dipasang pada bagian atas kerangka agar dapat menginjeksikan larutan disinfektan ke dalam sistem, sedangkan pompa air dipasang dan dihubungkan antara outlet Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dengan tangki penyimpanan sehingga air limbah dapat dialirkan ke dalam rangkaian alat penelitian.

Pembuatan larutan klorin dioksida diawali dengan menyiapkan bahan berupa 279 mL aquades, 3,5 mL larutan NaOH 30%, 33,5 mL larutan NaOCl 12%, 24 mL larutan $NaClO_2$ 28%, dan 5 mL larutan asam sitrat 16%, serta alat berupa *beaker glass*, gelas ukur, pipet, bulb, dan *magnetic stirrer*. Tahap pertama dilakukan dengan membuat larutan *base* sebanyak 250 mL menggunakan *beaker glass* yang ditempatkan di atas *magnetic stirrer*. Sebanyak 189 mL aquades dimasukkan ke dalam *beaker glass*, kemudian ditambahkan secara berturut-turut 3,5 mL NaOH 30%, 33,5 mL NaOCl 12%, dan 24 mL $NaClO_2$ 28% sambil diaduk hingga homogen. Selanjutnya, untuk menghasilkan 100 mL larutan klorin dioksida, sebanyak 5 mL larutan *base* dipindahkan ke dalam *beaker glass* lain, kemudian ditambahkan 90 mL aquades dan 5 mL larutan asam sitrat 16%. Terbentuknya larutan klorin dioksida ditandai dengan perubahan warna larutan menjadi kuning, yang menunjukkan konsentrasi klorin dioksida sebesar 798 mg/L.

2.4 Tahap Pelaksanaan

Proses pengujian dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan *fecal coliform* diawali dengan memompa sampel limbah cair dari outlet IPAL Domestik PT. X ke dalam tangki penyimpanan menggunakan pompa agar sampel terkumpul dalam satu wadah yang homogen. Sebelum perlakuan, dilakukan pengambilan sampel awal (*pretest*) pada pipa sebelum limbah dialirkan ke tangki perlakuan untuk mengetahui kadar awal *fecal coliform*. Sampel yang telah terkumpul kemudian dialirkan secara

gravitasi ke tiga tangki perlakuan dengan volume masing-masing 5 liter. Selanjutnya, dilakukan perhitungan kebutuhan volume larutan klorin dioksida menggunakan rumus pengenceran ($C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$), sehingga diperoleh volume larutan klorin dioksida berkonsentrasi 798 mg/L yang harus ditambahkan, yaitu 6,27 mL untuk dosis 1 mg/L, 12,53 mL untuk dosis 2 mg/L, dan 18,80 mL untuk dosis 3 mg/L. Larutan klorin dioksida kemudian diinjeksi ke masing-masing tangki perlakuan menggunakan *dosing pump* dengan dosis 1 mg/L pada tangki C1, 2 mg/L pada tangki C2, dan 3 mg/L pada tangki C3. Setelah pembubuhan disinfektan, sampel didiamkan selama 30 menit sebagai waktu kontak agar proses disinfeksi berlangsung secara optimal. Selanjutnya, dilakukan pengambilan sampel setelah perlakuan (*posttest*) melalui kran pada masing-masing tangki perlakuan untuk mengukur kadar *fecal coliform* setelah pemberian klorin dioksida. Setelah seluruh sampel selesai diambil, tangki perlakuan dikosongkan dan dibersihkan sebelum digunakan kembali pada pengulangan berikutnya. Seluruh tahapan pengujian tersebut diulang hingga diperoleh enam kali pengulangan sebagai replikasi penelitian.

2.5 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap menggunakan perangkat lunak statistik. Tahap pertama adalah analisis univariat yang bertujuan untuk mendeskripsikan karakteristik setiap variabel penelitian. Data numerik hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel distribusi deskriptif yang meliputi ukuran pemusatan data, yaitu nilai rerata (*mean*) dan *median*, serta ukuran penyebaran data yang terdiri atas nilai minimum, maksimum, dan standar deviasi.

Selanjutnya dilakukan uji normalitas menggunakan uji Shapiro-Wilk karena jumlah sampel penelitian kurang dari 50 sampel. Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah data berdistribusi normal dengan kriteria nilai signifikansi (p-value) > 0,05 menunjukkan data berdistribusi normal, sedangkan nilai p-value < 0,05 menunjukkan data tidak berdistribusi normal. Setelah itu dilakukan uji homogenitas varians menggunakan Levene's Test untuk mengetahui kesamaan varians antar kelompok perlakuan. Data dinyatakan homogen apabila nilai signifikansi (p-value) > 0,05, sedangkan nilai p-value < 0,05 menunjukkan bahwa varians antar kelompok tidak homogen.

Tahap berikutnya adalah analisis bivariat untuk menguji perbedaan penurunan *fecal coliform* berdasarkan variasi dosis klorin dioksida (ClO_2). Apabila data memenuhi asumsi normalitas dan homogenitas, analisis dilakukan menggunakan uji One-Way ANOVA pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Hipotesis yang diuji adalah H_0, yaitu tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara variasi dosis klorin dioksida terhadap penurunan *fecal coliform*, dan H_a, yaitu terdapat perbedaan yang signifikan antara variasi dosis klorin dioksida terhadap penurunan *fecal coliform*. H_0 ditolak apabila nilai p-value < 0,05 dan H_a diterima, sedangkan H_0 diterima apabila nilai p-value > 0,05. Jika hasil uji One-Way ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka analisis dilanjutkan dengan uji Post Hoc Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*) untuk mengetahui pasangan kelompok dosis yang memiliki perbedaan bermakna. Pasangan kelompok dinyatakan berbeda secara signifikan apabila nilai p-value < 0,05. Sebaliknya, apabila data tidak memenuhi asumsi normalitas, analisis dilakukan menggunakan uji nonparametrik Kruskal-Wallis untuk mengetahui ada atau tidaknya perbedaan penurunan *fecal coliform* antar kelompok perlakuan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengukuran pH

Pengukuran pH dilakukan pada setiap sampel sebelum (*pre*) dan sesudah (*post*) pemberian klorin dioksida (ClO_2) menggunakan pH meter untuk mengetahui pengaruh pemberian disinfektan terhadap derajat keasaman air limbah. Hasil pengukuran pH pada masing-masing dosis ClO_2 dan pengulangan disajikan pada Tabel 1. sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran pH pada Sampel

Pengulangan	pH Setiap Sampel Dosis Klorin Dioksida (ClO_2)					
	1 mg/L		2 mg/L		3 mg/L	
	Pre	*Post*	*Pre*	*Post*	*Pre*	*Post*
1	7,51	7,47	7,50	7,45	7,51	7,42
2	7,50	7,47	7,51	7,45	7,51	7,43
3	7,51	7,48	7,51	7,44	7,51	7,41
4	7,53	7,49	7,52	7,46	7,52	7,42
5	7,51	7,50	7,52	7,45	7,51	7,42
6	7,50	7,48	7,51	7,44	7,49	7,41
Minimum	7,50	7,47	7,50	7,44	7,49	7,41
Maksimum	7,53	7,50	7,52	7,46	7,52	7,43

Nilai pH awal yang relatif seragam antar kelompok menunjukkan bahwa kondisi sampel sebelum perlakuan berada dalam rentang yang homogen. Berdasarkan data tersebut, terdapat penurunan nilai pH setelah pemberian ClO_2 pada seluruh kelompok dosis, meskipun perubahan yang terjadi relatif kecil.

3.2 Pengukuran Suhu

Pengukuran suhu dilakukan pada setiap sampel sebelum (*pre*) dan sesudah (*post*) pemberian klorin dioksida (ClO_2) menggunakan pH meter untuk mengetahui apakah pemberian disinfektan berpengaruh terhadap suhu air limbah. Hasil pengukuran suhu pada masing-masing dosis ClO_2 dan pengulangan disajikan pada Tabel 2. sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Pengukuran Suhu pada Sampel

Pengulangan	Suhu (°C) Setiap Sampel Dosis Klorin Dioksida (ClO_2)					
	1 mg/L		2 mg/L		3 mg/L	
	Pre	*Post*	*Pre*	*Post*	*Pre*	*Post*
1	26,9	26,7	26,9	26,7	26,9	26,7
2	26,7	26,4	26,7	26,4	26,7	26,4
3	26,5	26,4	26,5	26,4	26,5	26,4
4	26,8	26,9	26,8	26,9	26,8	26,9
5	27,1	27,2	27,1	27,2	27,1	27,2
6	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9
Minimum	26,5	26,4	26,5	26,4	26,5	26,4
Maksimum	27,1	27,2	27,1	27,2	27,1	27,2

Keseragaman nilai suhu awal pada ketiga kelompok menunjukkan bahwa kondisi sampel sebelum perlakuan berada dalam rentang yang homogen. Berdasarkan data tersebut, tidak terdapat perubahan suhu yang signifikan setelah pemberian ClO_2 pada seluruh kelompok dosis. Nilai suhu pre dan post pada ketiga kelompok dosis menunjukkan hasil yang relatif sama, dengan selisih yang sangat kecil yaitu hanya 0,1°C.

3.3 Pengukuran *Fecal Coliform*

Penelitian ini menggunakan tiga variasi dosis klorin dioksida (ClO_2) yaitu 1 mg/L, 2 mg/L, dan 3 mg/L dengan masing-masing 6 kali pengulangan. Pemeriksaan sampel dilakukan pada sampel sebelum diberi perlakuan (*pretest*) dan pada sampel setelah diberi perlakuan (*posttest*) pada masing-masing kelompok dosis dan pengulangan. Baku mutu bakteri *fecal coliform* menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 11 tahun 2025 adalah 1.000 MPN/100 mL. Penurunan bakteri *fecal coliform* dihitung berdasarkan selisih nilai *pre* dan *post* pada setiap perlakuan. Hasil pemeriksaan bakteri *fecal coliform* disajikan pada Tabel 3. dan Tabel 4. sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Bakteri *Fecal Coliform*

Pengulangan	Data Jumlah Bakteri *Fecal Coliform* (MPN/100 mL)					
	1 mg/L		2 mg/L		3 mg/L	
	Pre	***Post***	***Pre***	***Post***	***Pre***	***Post***
1	26.000	21.300	25.500	17.000	26.000	8.900
2	25.000	20.500	26.000	16.500	25.300	8.200
3	27.000	21.800	27.200	17.500	27.200	9.100
4	24.500	20.200	24.700	16.000	24.400	7.800
5	26.500	21.500	27.000	17.000	26.300	8.700
6	25.500	20.900	25.500	16.700	25.600	8.300

Tabel 4. Hasil Selisih dan Persentase Bakteri *Fecal Coliform*

Pengulangan	Data Penurunan Jumlah Bakteri *Fecal Coliform* (MPN/100 mL)					
	1 mg/L		2 mg/L		3 mg/L	
	Selisih	**Persentase (%)**	**Selisih**	**Persentase (%)**	**Selisih**	**Persentase (%)**
1	4.700	18,08	8.500	33,33	17.100	65,77
2	4.500	18,00	9.500	36,54	17.100	67,59
3	5.200	19,26	9.700	35,66	18.100	66,54
4	4.300	17,55	8.700	35,22	16.600	68,03
5	5.000	18,87	10.000	37,04	17.600	66,92
6	4.600	18,04	8.800	34,51	17.300	67,58

Tabel 3. menunjukkan data jumlah bakteri *fecal coliform* sebelum (*pre*) dan sesudah (*post*) pemberian klorin dioksida (ClO_2) pada masing-masing dosis dengan 6 kali pengulangan. Berdasarkan data tersebut, nilai *post* pada ketiga dosis lebih rendah dibandingkan nilai *pre*, yang menunjukkan bahwa seluruh perlakuan pemberian ClO_2 menghasilkan penurunan jumlah bakteri *fecal coliform*. Nilai *post* terendah ditemukan pada dosis 3 mg/L yaitu 7.800 MPN/100 mL, sedangkan nilai *post* tertinggi terdapat pada dosis 1 mg/L yaitu 21.800 MPN/100 mL.

Tabel 4. menunjukkan data penurunan jumlah bakteri *fecal coliform* yang dinyatakan dalam selisih (MPN/100 mL) dan persentase penurunan (%) pada masing-masing dosis ClO_2. Berdasarkan data tersebut, dosis 3 mg/L menghasilkan penurunan *fecal coliform* tertinggi dibandingkan dosis 1 mg/L dan 2 mg/L, baik ditinjau dari nilai selisih maupun persentase penurunan. Sebaliknya, dosis 1 mg/L menghasilkan penurunan terendah di antara ketiga kelompok perlakuan.

3.4 Analisis Data

Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk dengan nilai signifikansi pada dosis 1 mg/L sebesar 0,866, dosis 2 mg/L sebesar 0,427, dan dosis 3 mg/L sebesar 0,887. Seluruh kelompok perlakuan menunjukkan distribusi data normal karena memiliki nilai signifikansi > 0,05. Hasil uji homogenitas pada *mean*

memiliki nilai Levene Statistic sebesar 2,137 dengan nilai signifikansi 0,153. Nilai signifikansi tersebut menunjukkan p > 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa varians data penurunan *fecal coliform* antar kelompok dosis bersifat homogen. Dengan terpenuhinya asumsi normalitas dan homogenitas varians, maka seluruh syarat untuk dilakukan uji One-Way ANOVA telah terpenuhi. Uji One-Way ANOVA dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan pada penurunan *fecal coliform* antar kelompok dosis klorin dioksida (ClO_2). Hasil uji One-Way ANOVA disajikan pada Tabel 5. sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Uji One-Way ANOVA

	Sum of Squares	**df**	***Mean Square***	**F**	**Sig.**
Between Groups	488101111,111	2	244050555.556	981,875	0,000
Within Groups	3728333,333	15	248555.556		
Total	491829444,444	17			

Tabel 5. menunjukkan seluruh kelompok dosis memiliki nilai F hitung sebesar 981,875 dengan nilai signifikansi 0,000. Nilai signifikansi tersebut menunjukkan p < 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara perbedaan dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan *fecal coliform*. Dengan demikian, hipotesis nol (H_0) yang menyatakan tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara perbedaan dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan *fecal coliform* ditolak, dan hipotesis alternatif (Ha) yang menyatakan terdapat perbedaan yang signifikan antara perbedaan dosis klorin dioksida (ClO_2) terhadap penurunan *fecal coliform* diterima.

Untuk mengetahui kelompok dosis mana yang berbeda secara signifikan, maka analisis dilanjutkan dengan uji Post Hoc Tukey HSD. Hasil uji One-Way ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok dosis, sehingga dilakukan uji lanjut Post Hoc Tukey HSD untuk mengetahui pasangan kelompok dosis mana saja yang berbeda secara signifikan. Hasil uji Post Hoc Tukey HSD disajikan pada tabel 6. sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Uji Post Hoc Tukey HSD

Dosis (I)	**Dosis (J)**	***Mean Difference* (I-J)**	***Std. Error***	**Sig.**	**95% *Confidence Interval***	
					Lower Bound	***Upper Bound***
1 mg/L	2 mg/L	-4483,333*	287.840	.000	-5230.99	-3735.68
	3 mg/L	-12.583,333*	287.840	.000	-13330.99	-11835.68
2 mg/L	1 mg/L	4483,333*	287.840	.000	3735.68	5230.99
	3 mg/L	-8100,000*	287.840	.000	-8847.66	-7352.34
3 mg/L	1 mg/L	12.583,333*	287.840	.000	11835.68	13330.99
	2 mg/L	8100,000*	287.840	.000	7352.34	8847.66

Tabel 6. menunjukkan seluruh pasangan kelompok dosis memiliki nilai signifikansi 0,000 (p < 0,05). Dapat disimpulkan bahwa setiap pasangan kelompok dosis ClO_2 berbeda secara signifikan satu sama lain dalam menghasilkan penurunan *fecal coliform*. Dosis 3 mg/L menghasilkan penurunan *fecal coliform* yang paling tinggi dibandingkan dosis 1 mg/L maupun 2 mg/L, sehingga dosis 3 mg/L merupakan dosis yang paling efektif dalam menurunkan *fecal coliform* pada outlet IPAL Domestik PT. X di antara ketiga dosis yang diujikan.

3.5 Pengaruh pH

Teori terkait efektivitas inaktivasi ClO_2 menyatakan bahwa efektivitas inaktivasi ClO_2 tidak terlalu terlalu dipengaruhi oleh pH karena ClO_2 mampu bekerja secara efektif pada rentang pH yang luas yaitu 3,0–9,0, berbeda dengan klorin konvensional yang hanya optimal pada pH 7,0–8,0. Dengan demikian, kondisi pH air limbah dalam penelitian ini yang berada pada rentang 7,41–7,53 masih berada jauh dalam zona kerja optimal ClO_2, sehingga pH tidak menjadi faktor penghambat efektivitas disinfeksi pada penelitian ini [6].

Kondisi pH ini sejalan dengan penelitian Akhlaghi, dkk [8] yang melakukan disinfeksi ClO_2 pada rentang pH 6,9–7,3, dan berhasil membuktikan bahwa ClO_2 efektif menurunkan *fecal coliform* hingga 0 MPN/100 mL pada dosis 1,5 mg/L. Kemiripan rentang pH antara penelitian Akhlaghi, dkk [8] (6,9–7,3) dengan penelitian ini (7,41–7,53) menunjukkan bahwa kedua penelitian berada pada kondisi pH yang sama-sama mendukung kerja optimal ClO_2. Terdapat sedikit penurunan nilai pH setelah pemberian ClO_2 pada seluruh kelompok dosis. Penurunan pH yang kecil ini bersifat wajar karena ClO_2 memiliki pH 5.0–7.0 yang sedikit memengaruhi derajat keasaman larutan, namun tidak signifikan mengubah karakteristik pH air limbah secara keseluruhan [6].

3.5 Pengaruh Suhu

Teori terkait efektivitas inaktivasi ClO_2 menyatakan bahwa peningkatan suhu umumnya akan meningkatkan reaksi ClO_2 dengan mikroorganisme sehingga efektivitas disinfeksi juga meningkat, dengan suhu optimal berada pada suhu ruang hingga kisaran 30°C–40°C. Suhu air limbah dalam penelitian ini yang berada pada kisaran 26,4–27,2°C termasuk dalam rentang suhu ruang yang mendukung reaktivitas ClO_2 terhadap sel bakteri. Oleh karena itu, suhu pada penelitian ini tidak menjadi faktor penghambat efektivitas disinfeksi ClO_2 terhadap *fecal coliform* [6].

Apabila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, penelitian Akhlaghi, dkk [8] dilakukan pada suhu 25±2°C yang sangat mendekati suhu pada penelitian ini, yaitu 26,4–27,2°C. Pada kondisi suhu tersebut, Akhlaghi, dkk [8] berhasil membuktikan bahwa ClO_2 efektif menurunkan *fecal coliform* secara signifikan, yang mengindikasikan bahwa kisaran suhu 25–27°C merupakan kondisi yang cukup optimal bagi kerja ClO_2.

Stabilnya nilai suhu pada seluruh pengulangan dan seluruh kelompok dosis juga menunjukkan bahwa kondisi lingkungan selama penelitian berlangsung cukup homogen dan terkontrol, sehingga faktor suhu tidak memberikan pengaruh yang berbeda-beda antar kelompok perlakuan. Dengan demikian, perbedaan penurunan *fecal coliform* yang terjadi antar kelompok dosis dapat lebih dipastikan disebabkan oleh perbedaan dosis ClO_2 dan bukan oleh variasi suhu antar kelompok.

3.6 Penurunan Bakteri *Fecal Coliform*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian klorin dioksida (ClO_2) pada limbah cair outlet IPAL Domestik PT. X mampu menurunkan jumlah bakteri *fecal coliform* pada seluruh kelompok dosis yang diujikan. Rata-rata penurunan pada dosis 1 mg/L sebesar 4.717 MPN/100 mL (18,10%), dosis 2 mg/L sebesar 9.200 MPN/100 mL (35,35%), dan dosis 3 mg/L sebesar 17.300 MPN/100 mL (66,96%).

Temuan ini sesuai dengan karakteristik ClO_2 sebagai disinfektan yang memiliki kemampuan oksidasi kuat terhadap mikroorganisme. Secara mekanisme, ClO_2 bekerja dengan cara merusak dinding sel bakteri melalui proses oksidasi, mengganggu permeabilitas membran sitoplasma, serta menghambat sintesis protein intraseluler sehingga menyebabkan kematian sel bakteri. Hasil penelitian terdahulu

mendukung bahwa mekanisme utama kerja ClO_2 dalam membunuh bakteri terjadi melalui gangguan pada sintesis protein sel. Bakteri *fecal coliform* yang merupakan bakteri gram negatif memiliki membran luar yang relatif permeabel terhadap senyawa oksidator seperti ClO_2, sehingga lebih rentan terhadap disinfektan ini [11].

Konsentrasi disinfektan merupakan faktor utama yang menentukan efektivitas inaktivasi bakteri. Hasil kajian ilmiah menunjukkan bahwa efek konsentrasi disinfektan dan suhu bersifat positif terhadap kemampuan inaktivasi, dan ClO_2 terbukti efektif membunuh bakteri pada rentang pH yang lebih luas dibandingkan klorin cair. Dalam penelitian ini, peningkatan dosis ClO_2 dari 1 mg/L ke 3 mg/L secara konsisten meningkatkan persentase penurunan *fecal coliform*, yang membuktikan bahwa konsentrasi disinfektan berbanding lurus dengan efektivitas inaktivasi bakteri.

Penelitian ini sejalan dengan penelitian Akhlaghi, dkk [8] yang menggunakan waktu kontak 30 menit pada suhu 25±2°C dan pH 6,9–7,3 berhasil mencapai penurunan *fecal coliform* hingga di bawah 1,1 MPN/100 mL pada dosis 0,5 mg/L. Sementara itu, penelitian Ma, dkk [9] secara *in vitro* membuktikan bahwa ClO_2 pada konsentrasi 5 mg/L dengan waktu kontak 10 menit mampu menurunkan *E. coli* dan *Klebsiella pneumoniae* yang termasuk dalam kelompok *fecal coliform* hingga lebih dari 99,9%.

Tidak tercapainya penurunan hingga baku mutu bisa dipengaruhi oleh nilai *fecal coliform* pada limbah cair domestik PT. X yang berpotensi dipengaruhi oleh fluktuasi aktivitas karyawan di lingkungan perusahaan. Limbah cair domestik yang masuk ke IPAL bersumber dari aktivitas sehari-hari karyawan seperti penggunaan toilet, kantin, dan fasilitas sanitasi lainnya, sehingga jumlah karyawan yang aktif pada waktu pengambilan sampel dapat memengaruhi beban *fecal coliform* yang masuk ke sistem pengolahan. Nilai *fecal coliform* pada outlet IPAL domestik PT. X berpotensi dipengaruhi oleh fluktuasi aktivitas manusia di lingkungan perusahaan yang tidak hanya berasal dari karyawan tetap, tetapi juga dari aktivitas tambahan seperti kunjungan tamu, penyelenggaraan acara, maupun kegiatan proyek yang berlangsung di lokasi.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu menunjukkan perbedaan efektivitas yang cukup signifikan. Perbedaan ini diduga tidak hanya disebabkan oleh perbedaan beban cemaran awal, tetapi juga oleh karakteristik matriks limbah cair domestik PT. X. Karakteristik tersebut dapat memengaruhi hasil inaktivasi ClO_2 melalui dua mekanisme berbeda. Beban cemaran awal *fecal coliform* maupun beban bahan organik dan padatan tersuspensi pada IPAL turut bervariasi mengikuti aktivitas karyawan yang jumlah dan intensitasnya berfluktuasi setiap harinya. Selain faktor fluktuasi beban tersebut, terdapat dua mekanisme spesifik yang diduga turut berkontribusi menurunkan efektivitas ClO_2 pada sampel PT. X. Pertama, tingginya kandungan bahan organik terlarut yang tercermin dari parameter seperti COD dan BOD berpotensi meningkatkan *chlorine demand,* yaitu sebagian besar ClO_2 yang diberikan terlebih dahulu mengoksidasi matriks organik tersebut, sehingga residual ClO_2 yang benar-benar tersedia untuk kontak dengan sel bakteri menjadi jauh lebih rendah dibandingkan dosis yang diaplikasikan di awal [12]. Kedua, keberadaan padatan tersuspensi (TSS) yang umum ditemukan pada limbah domestik memungkinkan terjadinya fenomena *microbial shielding,* yaitu bakteri yang terperangkap di dalam atau menempel pada permukaan partikel tersuspensi menjadi terlindungi dari kontak langsung dengan molekul ClO_2, karena disinfektan tersebut harus terlebih dahulu berdifusi menembus lapisan partikel sebelum dapat menginaktivasi sel bakteri yang berada di baliknya [12]. Sebagai keterbatasan pembanding, penelitian terdahulu tidak melaporkan angka beban cemaran awal *fecal coliform* maupun parameter pendukung seperti TSS, COD, dan BOD pada penelitian mereka, sehingga perbandingan efektivitas penurunan bakteri antar penelitian ini bersifat terbatas. Parameter pendukung seperti TSS,

COD, dan BOD tidak diukur dalam penelitian ini, sehingga dugaan mengenai peran *chlorine demand* dan *microbial shielding* terhadap rendahnya efektivitas ClO_2 pada sampel PT. X belum dapat dibuktikan secara kuantitatif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis ClO_2 berbanding lurus terhadap penurunan *fecal coliform*. Namun, pengujian yang terbatas pada rentang dosis 1–3 mg/L menyebabkan dosis tertinggi 3 mg/L belum mampu mencapai baku mutu *fecal coliform* sesuai Permen LH No. 11 Tahun 2025 sebesar 1.000 MPN/100 mL. Tidak tercapainya baku mutu bisa juga disebabkan karena dosis yang digunakan belum cukup untuk menurunkan jumlah *fecal coliform* yang ada pada limbah cair tersebut, sehingga penentuan dosis sangat ditentukan dari beban cemaran awal atau bakteri *fecal coliform*. Penelitian belum mengeksplorasi dosis yang lebih tinggi sehingga belum dapat ditentukan dosis optimal yang benar-benar mampu memenuhi standar baku mutu yang dipersyaratkan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kadar *fecal coliform* sebelum pemberian ClO_2 (*pre*) berkisar antara 24.400–27.200 MPN/100 mL. Setelah pemberian ClO_2 (*post*), kadar *fecal coliform* mengalami penurunan pada seluruh variasi dosis, yaitu menjadi 20.200–21.800 MPN/100 mL pada dosis 1 mg/L, 16.000–17.500 MPN/100 mL pada dosis 2 mg/L, dan 7.800–9.100 MPN/100 mL pada dosis 3 mg/L. Persentase rata-rata penurunan *fecal coliform* berturut-turut sebesar 18,10% pada dosis 1 mg/L, 35,35% pada dosis 2 mg/L, dan 66,96% pada dosis 3 mg/L. Hasil analisis menggunakan uji One-Way ANOVA menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 ($p < 0,05$) yang menunjukkan bahwa variasi dosis klorin dioksida berpengaruh signifikan terhadap penurunan *fecal coliform*. Di antara ketiga dosis yang diuji, dosis ClO_2 3 mg/L merupakan dosis yang paling efektif dalam menurunkan *fecal coliform*, dengan kadar akhir berkisar antara 7.800–9.100 MPN/100 mL atau rata-rata persentase penurunan sebesar 66,96%.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi variasi dosis ClO_2 yang lebih tinggi dari 3 mg/L, mengingat seluruh dosis yang diuji pada penelitian ini belum mampu memenuhi baku mutu *fecal coliform* sebesar 1.000 MPN/100 mL sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025. Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk menguji variasi waktu kontak yang lebih beragam dan tidak hanya terbatas pada 30 menit, sehingga dapat diperoleh kombinasi dosis dan waktu kontak yang paling efektif dalam menurunkan *fecal coliform* pada limbah cair domestik. Selain itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengukur parameter pendukung TSS, COD, dan BOD secara bersamaan dengan *fecal coliform* pada setiap pengambilan sampel guna mengonfirmasi kontribusi *chlorine demand* dan *microbial shielding* terhadap efektivitas inaktivasi bakteri oleh ClO_2. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi dasar penerapan klorin dioksida (ClO_2) pada skala lapangan di PT. X dengan mempertimbangkan kondisi operasional serta debit harian IPAL, sehingga penggunaan ClO_2 dapat dipertimbangkan sebagai alternatif metode disinfeksi limbah cair domestik yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Widyarani, D. R. Wulan, U. Hamidah, A. Komarulzaman, R. T. Rosmalina, and N. Sintawardani, "Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 22, pp. 32397–32414, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-19057-6.

[2] Kementerian Lingkungan Hidup, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian*

Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2025 Tentang Baku Mutu Air Limbah dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah Untuk Air Limbah Domestik. Indonesia, 2025. [Online]. Available: https://jdih.kemenlh.go.id/admin/storage/dokumen_hukum/68d3f18d1b3d7.pdf

[3] WHO, *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*, 4th ed. Geneva, 2022.

[4] D. K. Sofyan, "Peramalan Kebutuhan Klorin (Cl2) Pada Bagian Produksi Di PT Pupuk Iskandar Muda," *Ind. Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 30–35, 2018, [Online]. Available: https://journal.unimal.ac.id/miej/article/view/294/208

[5] N. I. Said, *Teknologi Pengolahan Air Limbah: Teori dan Aplikasi*. Jakarta: Penerbit Erlangga, 2017.

[6] M. Mzinyathi *et al.*, "Chlorine dioxide drinking water pre-oxidation and disinfection: A review of its effectiveness, mechanisms, and disinfection by-products," *Desalin. Water Treat.*, vol. 323, no. May, p. 101340, 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101340.

[7] B. H. Durmishi, A. A. Reka, T. Gjuladin -Hellon1b, M. Ismaili, M. Srbinovski, and A. Shabani, "Disinfection of Drinking Water and Trihalomethanes: A Review," *Int. J. Adv. Res. Chem. Sci.*, vol. 2, no. 11, pp. 45–56, 2015, [Online]. Available: www.arcjournals.org

[8] M. Akhlaghi, A. Dorost, K. Karimyan, M. R. Narooie, and H. Sharafi, "Data for comparison of chlorine dioxide and chlorine disinfection power in a real dairy wastewater effluent," *Data Br.*, vol. 18, pp. 886–890, 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.03.117.

[9] J. W. Ma *et al.*, "Efficacy and safety evaluation of a chlorine dioxide solution," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 14, no. 3, 2017, doi: 10.3390/ijerph14030329.

[10] Hardani *et al.*, *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif*, 1st ed. Yogyakarta: Pustaka Ilmu, 2020.

[11] Y. Jiang *et al.*, "Application of chlorine dioxide and its disinfection mechanism.," *Arch. Microbiol.*, vol. 206, no. 10, p. 400, Sep. 2024, doi: 10.1007/s00203-024-04137-7.

[12] E. Friedler, D. F. Chavez, Y. Alfiya, Y. Gilboa, and A. Gross, "Impact of Suspended Solids and Organic Matter on Chlorine and UV Disinfection Efficiency of Greywater," *Water*, vol. 13, no. 2, 2021, doi: 10.3390/w13020214.