

Evaluation of Preventive Operational Control in Maintaining Treated Water Turbidity Stability at SPAM Katulampa, Bogor City

Evaluasi Pengendalian Operasional Preventif dalam Menjaga Stabilitas Kekeruhan Air Hasil pada SPAM Katulampa Kota Bogor

Niesa Hanum Mistoro¹, Enry Adiarto Guntoro¹, Noviani Ima Wantoputri¹, Makmur Gunawan², Muhammad Yacob²

¹Universitas Islam Indonesia, Indonesia

²Perumda Tirta Pakuan Kota Bogor, Indonesia

*surel: niesa.mistoro@uii.ac.id

ABSTRACT

Treated water turbidity stability is an important indicator of operational reliability in surface-water-based drinking water treatment plants. This study evaluated preventive operational control at SPAM Katulampa, Bogor City, using daily operational data from 10 February to 10 March 2026 and field observations. The evaluated parameters included raw and treated water turbidity, raw water flow rate, turbidity removal efficiency, and preventive control practices in each treatment unit. Data were analyzed using descriptive statistics and the coefficient of variation, followed by development of a preventive operational control matrix. Raw water turbidity fluctuated markedly, with an average of 58.83 NTU, a range of 12.00–262.98 NTU, and a coefficient of variation of 88.49%. In contrast, treated water turbidity remained stable, averaging 0.61 NTU with a range of 0.52–0.91 NTU and a coefficient of variation of 16.83%, consistently meeting the 3 NTU drinking water standard. Stability was supported by integrated controls at the intake, coagulation, flocculation, sedimentation, filtration, reservoir, and overall operation stages. Key measures included screening, coagulation control, sludge draining, filter backwashing, media maintenance, and final water quality verification. The findings confirm that stable treated water quality results from coordinated preventive control across the treatment train.

ABSTRAK

Stabilitas kekeruhan air hasil merupakan indikator penting dalam menilai keandalan operasional instalasi pengolahan air minum berbasis air permukaan. Penelitian ini mengevaluasi pengendalian operasional preventif di SPAM Katulampa, Kota Bogor, menggunakan data operasional harian periode 10 Februari–10 Maret 2026 dan hasil observasi lapangan. Parameter yang dikaji mencakup kekeruhan air baku dan air hasil, debit air baku, efisiensi penurunan kekeruhan, serta praktik pengendalian preventif pada setiap unit proses. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan koefisien variasi, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan matriks pengendalian operasional preventif. Kekeruhan air baku berfluktuasi tinggi, dengan rata-rata 58,83 NTU, rentang 12,00–262,98 NTU, dan koefisien variasi 88,49%. Sebaliknya, kekeruhan air hasil tetap stabil, dengan rata-rata 0,61 NTU, rentang 0,52–0,91 NTU, dan koefisien variasi 16,83%, serta seluruhnya memenuhi baku mutu air minum sebesar 3 NTU. Stabilitas tersebut didukung oleh pengendalian terpadu pada intake, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, dan operasi keseluruhan. Tindakan utama meliputi penyaringan, pengendalian koagulasi, pengurasan lumpur, pencucian balik filter, pemeliharaan media, dan verifikasi kualitas air hasil. Hasil penelitian menegaskan bahwa kestabilan kualitas air merupakan hasil pengendalian preventif yang terkoordinasi di seluruh rangkaian pengolahan.

Keywords:

Turbidity,
Preventive Operational Control,
Drinking Water Treatment,
Control Point,
SPAM Katulampa

Received: June 30th 2026

Reviewed: July 15th 2026

Published: July 24th 2026

Kata Kunci:

Kekeruhan,
Pengendalian Operasional
Preventif,
Pengolahan Air Minum,
Titik Kendali,
SPAM Katulampa

Diterima: 30 Juni 2026

Direview: 15 Juli 2026

Dipublikasi: 24 Juli 2026



PENDAHULUAN

Penyediaan air minum yang aman merupakan bagian penting dalam pelayanan dasar masyarakat, karena kualitas air yang tidak terkendali dapat berdampak langsung terhadap kesehatan, keberterimaan konsumen, dan keberlanjutan sistem distribusi. Dalam sistem penyediaan air minum, instalasi pengolahan air berperan untuk mengubah air baku menjadi air yang memenuhi persyaratan kualitas melalui rangkaian proses fisik, kimia, dan desinfeksi. Di Indonesia, penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum (SPAM) diarahkan untuk memenuhi aspek kualitas, kuantitas, kontinuitas, dan keterjangkauan pelayanan sesuai ketentuan penyelenggaraan SPAM nasional [1]. Dari sisi kesehatan lingkungan, kualitas air minum juga harus memenuhi standar baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, termasuk parameter fisik seperti kekeruhan [2].

Kekeruhan merupakan salah satu parameter utama dalam pengendalian kualitas air minum karena menggambarkan keberadaan partikel tersuspensi, koloid, bahan organik, maupun material halus lain yang terbawa dalam air. Kekeruhan yang tinggi tidak hanya menurunkan kualitas estetika air, tetapi juga dapat mengganggu efektivitas proses desinfeksi karena partikel tersuspensi dapat melindungi mikroorganisme dari kontak langsung dengan disinfektan. Oleh sebab itu, pemantauan kekeruhan menjadi indikator penting untuk menilai kestabilan proses pengolahan, khususnya pada unit koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi [3], [4]. Dalam praktik operasional instalasi pengolahan air minum, nilai kekeruhan air hasil yang rendah dan stabil menunjukkan bahwa rangkaian unit proses berjalan secara terkendali.

Instalasi pengolahan air minum berbasis air permukaan menghadapi tantangan yang lebih dinamis dibandingkan sumber air yang relatif stabil. Air sungai sebagai sumber air baku dapat mengalami perubahan kualitas dalam waktu singkat akibat hujan, limpasan permukaan, erosi, masukan lumpur, sampah, dan perubahan kondisi daerah tangkapan air. Kondisi tersebut dapat meningkatkan beban kekeruhan air baku dan berpotensi mengganggu kinerja unit pengolahan apabila tidak diikuti dengan pengendalian operasional yang tepat. Beberapa kajian pada instalasi pengolahan air minum di Indonesia menunjukkan bahwa evaluasi kinerja IPAM perlu memperhatikan keterkaitan antara kualitas air baku, kondisi unit proses, operasi koagulasi-sedimentasi-filtrasi, serta kualitas air hasil pengolahan [5], [6]. Dengan demikian, stabilitas air hasil tidak hanya ditentukan oleh satu unit proses, melainkan oleh koordinasi seluruh sistem pengolahan dan pengendalian operasional harian.

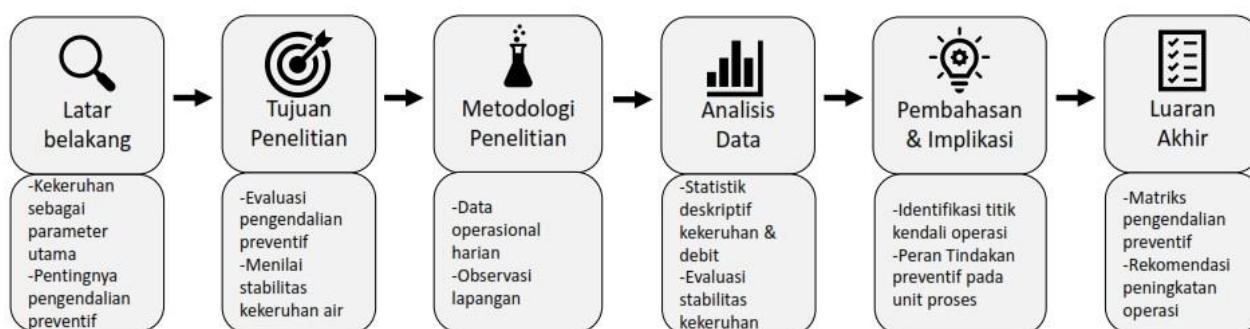
Pengendalian operasional preventif menjadi penting dalam menjaga kestabilan kualitas air hasil, terutama ketika kualitas air baku berfluktuasi. Pendekatan preventif dalam penyediaan air minum sejalan dengan konsep *water safety plan*, yaitu pengelolaan risiko secara menyeluruh dari sumber air hingga konsumen melalui identifikasi bahaya, titik kendali, pemantauan, dan tindakan korektif yang terencana [7]. Dalam konteks instalasi pengolahan air minum, bentuk pengendalian preventif dapat berupa pemantauan kekeruhan secara rutin, penyesuaian proses koagulasi, pengurasan unit sedimentasi, pemeliharaan flokulator, pencucian balik (*backwash*) unit filtrasi, serta pembersihan berkala untuk mencegah akumulasi lumpur dan penurunan kinerja media filter. Kajian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja filter dan pengaturan *backwash* berperan penting dalam menjaga kualitas air hasil, terutama karena akumulasi partikel pada media filter dapat memengaruhi efektivitas penyisihan kekeruhan [8] - [10].

SPAM Katulampa Kota Bogor merupakan salah satu instalasi pengolahan air minum yang menggunakan Sungai Ciliwung sebagai sumber air baku. Karakteristik air baku dari sungai tersebut berpotensi mengalami fluktuasi kekeruhan, terutama pada saat terjadi perubahan kondisi hidrologis. Berdasarkan informasi operasional lapangan, SPAM Katulampa menerapkan pengolahan air secara konvensional melalui tahapan *intake*, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, dan distribusi. Sistem operasional dilakukan secara kontinu selama 24 jam dengan pembagian tiga shift, disertai kegiatan pemeliharaan preventif seperti pengurasan unit sedimentasi dan *intermediate* setiap 12 jam, pengurasan flokulator setiap 24 jam, serta pembersihan berkala pada unit sedimentasi dan filtrasi. Pola operasi tersebut menunjukkan bahwa pengendalian kualitas air tidak hanya dilakukan melalui pemantauan hasil akhir, tetapi juga melalui pengendalian unit proses secara berkala.

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi kinerja instalasi pengolahan air minum dari aspek efisiensi penyisihan kekeruhan, optimasi koagulan, dan kualitas air hasil, kajian yang secara khusus menempatkan pengendalian operasional preventif sebagai fokus utama masih perlu diperkuat, khususnya pada konteks instalasi pengolahan air minum skala lapangan di Indonesia. Evaluasi berbasis data operasional dan informasi lapangan dapat memberikan gambaran praktis mengenai bagaimana tindakan preventif pada unit proses mendukung kestabilan kualitas air hasil. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengendalian operasional preventif dalam menjaga stabilitas kekeruhan air hasil pada SPAM Katulampa Kota Bogor. Fokus kajian diarahkan pada identifikasi titik kendali operasional, bentuk tindakan preventif pada unit proses, serta stabilitas kekeruhan air hasil berdasarkan data operasional. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengelolaan instalasi pengolahan air minum berbasis air permukaan, khususnya dalam memperkuat pemantauan dan tindakan preventif untuk menjaga kualitas air hasil secara konsisten.

METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengendalian operasional preventif dalam menjaga stabilitas kekeruhan air hasil pada SPAM Katulampa Kota Bogor. Tahapan penelitian meliputi perumusan latar belakang, penetapan tujuan, pengumpulan data operasional harian dan observasi lapangan, serta analisis stabilitas kekeruhan. Data operasional digunakan untuk menggambarkan kondisi kekeruhan selama periode pengamatan, sementara fokus utama penelitian adalah identifikasi dan evaluasi tindakan pengendalian preventif pada unit proses. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip pengendalian risiko dalam sistem penyediaan air minum yang menekankan identifikasi bahaya, titik kendali, pemantauan, dan tindakan korektif [7]. Hasil penelitian berupa matriks pengendalian operasional preventif dan rekomendasi peningkatan operasi tertera pada Gambar 1. Penelitian menggunakan data operasional harian periode 10 Februari–10 Maret 2026 dengan fokus pada kekeruhan sebagai indikator utama kualitas air hasil. Periode tersebut dipilih karena menyediakan rangkaian data operasional harian yang berkesinambungan dan mencakup variasi kekeruhan air baku dari kondisi rendah hingga kejadian peningkatan kekeruhan yang tinggi, sementara debit pengolahan relatif stabil. Oleh karena itu, periode ini dinilai memadai untuk mengevaluasi respons pengendalian operasional terhadap fluktuasi kualitas air baku selama kondisi pengamatan, meskipun tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan variasi musiman sepanjang tahun. Kekeruhan dipilih karena berkaitan dengan partikel tersuspensi yang memengaruhi efektivitas pengolahan dan desinfeksi [11]. Parameter lain seperti pH, warna, mikrobiologi, dan sisa klor tidak dianalisis secara kuantitatif, serta tidak dilakukan uji laboratorium tambahan maupun *jar test*, sehingga evaluasi berbasis kondisi operasional eksisting.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Lokasi dan Pendekatan Penelitian

Penelitian dilakukan di SPAM Katulampa Kota Bogor yang dikelola Perumda Tirta Pakuan, menggunakan air baku Sungai Ciliwung dengan sistem pengolahan konvensional (*intake*, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, distribusi). Sistem ini bertujuan memenuhi aspek kualitas, kuantitas, kontinuitas, dan keterjangkauan pelayanan [1], serta beroperasi 24 jam dalam tiga shift.

Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif-kuantitatif dengan metode studi kasus. Pendekatan deskriptif untuk mengidentifikasi pengendalian preventif, sedangkan kuantitatif untuk mengevaluasi stabilitas kekeruhan berdasarkan data harian. Penelitian tidak bertujuan menentukan dosis optimum koagulan, tetapi memahami peran pengendalian preventif dalam menjaga kestabilan kualitas air.

Sumber Data dan Parameter Kajian

Data terdiri atas data operasional harian dan informasi lapangan. Data operasional meliputi kekeruhan air baku dan hasil, debit air baku, penggunaan koagulan, serta efisiensi penurunan kekeruhan. Parameter utama adalah kekeruhan air hasil sebagai indikator stabilitas, sedangkan kekeruhan air baku dan debit sebagai parameter pendukung. Penggunaan koagulan hanya sebagai informasi konteks operasional. Informasi lapangan diperoleh dari observasi, laporan kerja praktik, dan keterangan operator untuk mengidentifikasi pengendalian preventif seperti pemantauan kekeruhan, pengendalian koagulasi, pengurusan sedimentasi dan flokulator, *backwash* filtrasi, serta pembersihan unit. Pengendalian pada unit koagulasi, flokulasi, dan filtrasi penting karena berperan langsung dalam penyisihan partikel dan pengendalian kekeruhan [12].

Prosedur Analisis Data

Analisis dilakukan dalam tiga tahap. Pertama, identifikasi alur proses pengolahan dari *intake* hingga distribusi beserta fungsi, potensi gangguan, indikator, dan tindakan preventif tiap unit. Kedua, analisis statistik deskriptif (rata-rata, minimum, maksimum, standar deviasi, dan koefisien variasi) untuk menggambarkan fluktuasi kekeruhan dan kondisi debit. Koefisien variasi dihitung dengan:

$$CV = (SD / \bar{X}) \times 100\%$$

Nilai CV yang lebih rendah menunjukkan kestabilan data yang lebih baik. Ketiga, evaluasi stabilitas kekeruhan dengan membandingkan kekeruhan air hasil terhadap baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 [2] serta membandingkan fluktuasi kekeruhan air baku dan hasil untuk menilai kemampuan sistem meredam perubahan kualitas air.

Evaluasi Pengendalian Operasional Preventif

Evaluasi dilakukan melalui penyusunan matriks titik kendali operasional yang memuat unit proses, potensi gangguan, indikator, tindakan preventif, dan fungsi pengendalian terhadap stabilitas kekeruhan. Unit *intake* dievaluasi terhadap masuknya sampah dan lumpur; koagulasi dan flokulasi terhadap pembentukan flok; sedimentasi terhadap pengurusan lumpur; filtrasi terhadap *backwash* dan pemeliharaan media; serta reservoir terhadap kestabilan kualitas sebelum distribusi. Pendekatan ini mengacu pada prinsip pengendalian preventif dalam sistem penyediaan air minum [7]. Pengendalian koagulasi dan filtrasi menjadi kunci karena berpengaruh langsung terhadap kestabilan kekeruhan air hasil [13]. Evaluasi tidak hanya menilai hasil akhir, tetapi juga efektivitas tindakan operasional preventif dalam menjaga kestabilan proses pengolahan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

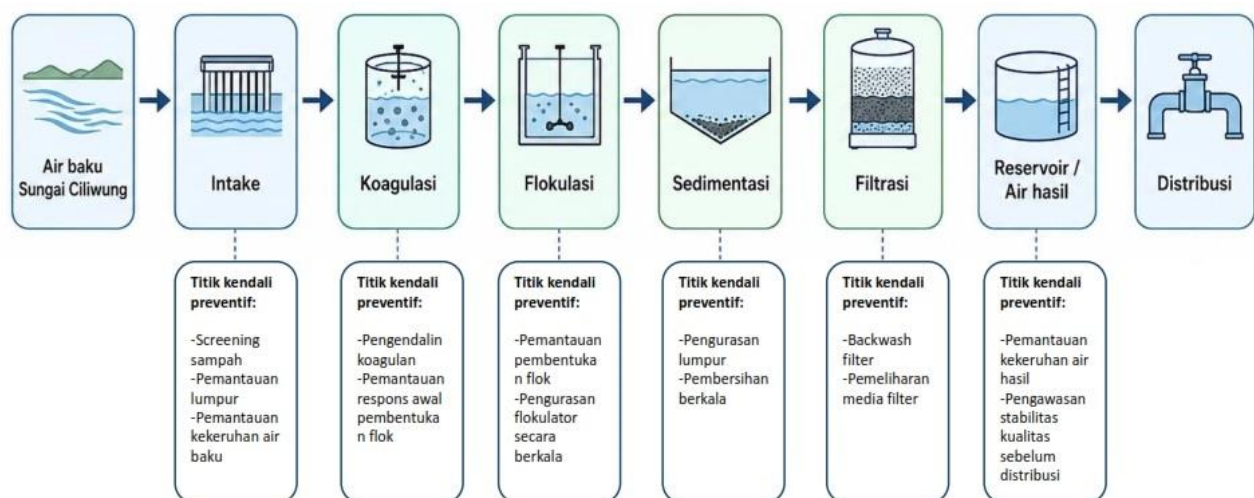
Karakteristik Sistem Pengolahan dan Kondisi Operasional SPAM Katulampa

SPAM Katulampa merupakan instalasi pengolahan air minum milik Perumda Tirta Pakuan Kota Bogor yang memanfaatkan air baku Sungai Ciliwung dengan kapasitas sekitar 600 L/detik (dua unit @300 L/detik). Sebagai instalasi berbasis air permukaan, kualitas air baku bersifat dinamis, terutama pada parameter kekeruhan akibat limpasan, lumpur, sampah, dan material tersuspensi. Kondisi ini menjadikan pengendalian operasional sebagai faktor kunci dalam menjaga stabilitas kualitas air hasil.

Sistem pengolahan yang digunakan adalah konvensional, meliputi unit *intake*, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, dan distribusi. Rangkaian proses ini bertujuan menurunkan partikel tersuspensi sehingga menghasilkan air dengan kekeruhan rendah. Dalam penyelenggaraan SPAM, pengendalian tiap unit proses penting untuk menjamin aspek kualitas, kuantitas, kontinuitas,

dan pelayanan [1]. Kekeruhan menjadi parameter utama karena berkaitan dengan partikel tersuspensi dan efektivitas desinfeksi [11]. Selain itu, beberapa studi evaluasi instalasi pengolahan air minum di Indonesia menunjukkan bahwa penilaian kinerja IPAM umumnya dilakukan melalui pengamatan terhadap rangkaian unit proses, kondisi operasional, dan kualitas air hasil sebagai indikator keberhasilan pengolahan [5], [6], [14], [15]. Pada unit *intake*, dilakukan penyaringan awal untuk menahan sampah kasar. Tahap berikutnya, koagulasi dan flokulasi berfungsi membentuk flok dari partikel koloid, yang kemudian diendapkan pada sedimentasi dan disisihkan lebih lanjut melalui filtrasi. Unit-unit ini merupakan titik kritis dalam pengendalian kekeruhan karena berperan langsung dalam penyisihan partikel [12].

Operasional instalasi berlangsung 24 jam dengan tiga shift, memungkinkan pemantauan kontinu dan respons cepat terhadap perubahan kualitas air baku. Pengendalian preventif dilakukan melalui pemeliharaan rutin, seperti pengurasan unit sedimentasi dan flokulator, serta *backwash* pada filtrasi untuk menjaga kinerja media. Kegiatan ini sejalan dengan prinsip *water safety plan*, yaitu pengendalian risiko melalui pemantauan dan tindakan korektif sebelum terjadi penurunan kualitas [7]. Skema proses dan titik kendali preventif ditunjukkan pada Gambar 2, yang menegaskan bahwa pengendalian kualitas dilakukan di setiap unit proses. Pada *intake*, pengendalian meliputi penyaringan sampah dan pemantauan kekeruhan. Pada koagulasi–flokulasi, fokus pada pembentukan flok, sedangkan pada sedimentasi dan filtrasi dilakukan pengurasan, pembersihan, dan *backwash*. Di reservoir, pemantauan kekeruhan menjadi indikator akhir sebelum distribusi.



Gambar 2. Skema proses pengolahan dan titik kendali operasional preventif pada SPAM Katulampa

Ringkasan karakteristik sistem dan kondisi operasional disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa stabilitas kekeruhan air hasil merupakan hasil integrasi antara proses pengolahan, pemantauan kualitas, dan pemeliharaan rutin pada unit-unit kritis.

Tabel 1. Karakteristik sistem pengolahan dan kondisi operasional SPAM Katulampa

Aspek	Keterangan	Relevansi terhadap pengendalian preventif
Sumber air baku	Sungai Ciliwung	Berpotensi mengalami fluktuasi kekeruhan akibat hujan, limpasan, sampah, dan lumpur
Sistem pengolahan	Konvensional: intake, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, distribusi	Setiap unit memerlukan titik kendali operasional
Kapasitas instalasi	±600 L/detik, terdiri atas dua unit pengolahan	Menunjukkan skala operasi lapangan
Pola operasi	24 jam, tiga shift	Mendukung pemantauan dan respons operasional kontinu
Pengendalian rutin	Drain sedimentasi/intermediate, drain flokulator, backwash filtrasi, pembersihan berkala	Menjadi dasar evaluasi tindakan preventif

Aspek	Keterangan	Relevansi terhadap pengendalian preventif
Gangguan utama	Sampah, lumpur, dan fluktuasi kekeruhan air baku	Menjelaskan kebutuhan pengendalian preventif

Fluktuasi Kekeruhan Air Baku dan Stabilitas Kekeruhan Air Hasil

Kekeruhan merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja pengolahan air minum karena mencerminkan keberadaan partikel tersuspensi dan koloid. Nilai kekeruhan yang tinggi dapat menurunkan kualitas estetika serta mengganggu efektivitas desinfeksi karena partikel dapat melindungi mikroorganisme dari disinfektan [11]. Oleh karena itu, pengendalian kekeruhan menjadi bagian penting dalam pengendalian risiko kualitas air, terutama pada sistem berbasis air permukaan yang rentan terhadap fluktuasi akibat hujan, limpasan, dan erosi.

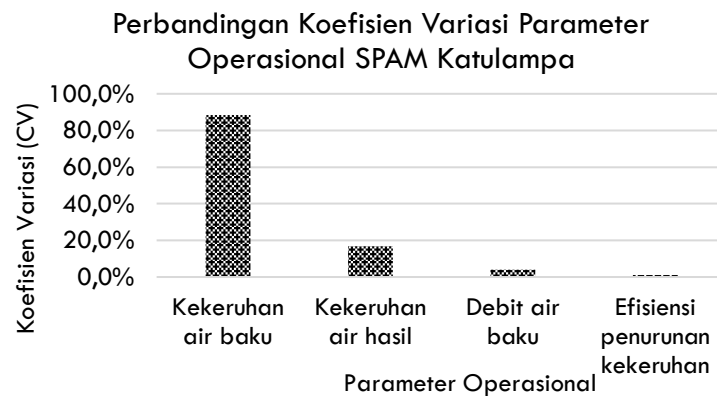
Hasil analisis statistik deskriptif data operasional SPAM Katulampa periode 10 Februari–10 Maret 2026 pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kekeruhan air baku memiliki rata-rata 58,83 NTU, dengan rentang 12,00–262,98 NTU dan rerata harian kekeruhan air baku maksimum sebesar 262,98 NTU. Nilai standar deviasi 52,06 NTU dan koefisien variasi (CV) 88,49% menunjukkan fluktuasi yang sangat tinggi. Kondisi ini mencerminkan karakteristik air permukaan yang dinamis dan dipengaruhi kondisi lingkungan. Kekeruhan merupakan parameter penting karena berkaitan dengan kandungan partikel dan kualitas air hasil pengolahan [16]. Sebaliknya, kekeruhan air hasil menunjukkan kondisi yang stabil dengan rata-rata 0,61 NTU (0,52–0,91 NTU), seluruhnya berada di bawah baku mutu 3 NTU [2]. Nilai standar deviasi 0,10 NTU dan CV 16,83% menunjukkan variasi yang rendah, menandakan kemampuan sistem dalam meredam fluktuasi air baku.

Tabel 2. Statistik deskriptif kekeruhan air baku, kekeruhan air hasil, dan debit operasional

Parameter	Satuan	Rata-rata	Minimum	Maksimum	Standar deviasi	CV (%)	Keterangan
Kekeruhan air baku	NTU	58,83	12,00	262,98	52,06	88,49	Menggambarkan beban kualitas air masuk yang fluktuatif
Kekeruhan air hasil	NTU	0,61	0,52	0,91	0,10	16,83	Indikator stabilitas kualitas air hasil pengolahan
Debit air baku	L/detik	155,79	145,00	169,17	6,12	3,93	Kondisi operasional pendukung selama periode pengamatan
Efisiensi penurunan kekeruhan	%	98,27	94,87	99,78	1,15	1,17	Indikator tambahan kemampuan sistem dalam meredam fluktuasi kekeruhan

Kondisi kekeruhan tertinggi selama periode penelitian terjadi pada 14 Februari 2026, ketika rerata harian kekeruhan air baku mencapai 262,98 NTU. Data pengamatan dua jam menunjukkan bahwa peningkatan kekeruhan mulai terjadi pada pukul 14.00 saat hujan, dengan nilai 729 NTU, dan mencapai nilai sesaat maksimum sebesar 803 NTU pada pukul 20.00. Catatan operasional menunjukkan adanya peningkatan pemakaian larutan PAC 10% pada shift pertama dari nilai operasional umum sebesar 1.000 menjadi 1.500, yang tercatat setara dengan 150 L atau 194,85 kg PAC. Selain itu, debit air baku diturunkan secara bertahap dari 180 L/detik pada pagi hari menjadi 150 L/detik saat kekeruhan mulai meningkat, kemudian menjadi 125–120 L/detik ketika kekeruhan mencapai 732–803 NTU. Meskipun terjadi peningkatan beban kekeruhan yang sangat tinggi, kekeruhan air hasil tetap berada pada rentang 0,34–0,76 NTU, dengan rerata harian 0,57 NTU. Temuan ini menunjukkan bahwa penyesuaian pemakaian koagulan dan pengurangan debit pengolahan menjadi respons operasional yang berperan dalam mempertahankan kestabilan kualitas air hasil pada kondisi peningkatan kekeruhan air baku.

Perbandingan pada Gambar 3 memperlihatkan perbedaan signifikan antara CV air baku (88,49%) dan air hasil (16,83%). Debit air baku relatif stabil (CV 3,93%), sehingga perubahan kekeruhan lebih dipengaruhi kualitas air masuk. Nilai CV efisiensi penurunan kekeruhan yang rendah (1,17%) menunjukkan konsistensi kinerja sistem, meskipun dalam penelitian ini hanya digunakan sebagai indikator tambahan. Stabilitas kekeruhan air hasil merupakan hasil keterpaduan proses koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan filtrasi. Koagulasi-flokulasi berperan dalam pembentukan flok, sedimentasi mengendapkannya, dan filtrasi menyisihkan partikel tersisa. [12] menekankan pentingnya pengendalian operasional pada proses ini, sementara [17] menegaskan bahwa efektivitas koagulasi-flokulasi sangat dipengaruhi karakteristik air baku dan kondisi proses.



Gambar 3. Perbandingan koefisien variasi parameter operasional SPAM Katulampa selama periode 10 Februari–10 Maret 2026

Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa SPAM Katulampa mampu menjaga kekeruhan air hasil tetap rendah meskipun air baku sangat fluktuatif. Hal ini mengindikasikan adanya pengendalian operasional yang efektif. Dalam perspektif *water safety plan*, stabilitas ini mencerminkan pentingnya pemantauan dan pengendalian berkelanjutan pada titik kritis proses, bukan hanya pada hasil akhir [7]. Temuan ini menjadi dasar untuk pembahasan titik kendali operasional preventif pada subbab berikutnya.

Titik Kendali Operasional Preventif dan Perannya terhadap Stabilitas Kekeruhan

Hasil pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa kekeruhan air hasil SPAM Katulampa tetap stabil meskipun kekeruhan air baku berfluktuasi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas kekeruhan tidak ditentukan oleh satu unit proses, melainkan oleh keterpaduan pengendalian operasional pada seluruh rangkaian pengolahan. Dalam prinsip *water safety plan*, pengendalian kualitas air dilakukan melalui identifikasi bahaya, penentuan titik kendali, pemantauan, dan tindakan korektif sebelum terjadi penurunan kualitas [7]. Oleh karena itu, evaluasi titik kendali operasional preventif penting untuk memahami bagaimana sistem mampu menjaga kualitas air hasil pada kondisi air baku yang dinamis.

Matriks titik kendali operasional preventif pada SPAM Katulampa di Tabel 3, menunjukkan bahwa setiap unit memiliki potensi gangguan, indikator pemantauan, dan tindakan preventif yang berbeda. Pendekatan ini sejalan dengan studi evaluasi IPAM yang menekankan pentingnya keterkaitan antara kondisi air baku, fungsi unit proses, kondisi operasional, dan kualitas air hasil [5], [6], [14], [15]. Dengan demikian, evaluasi tidak hanya berfokus pada kekeruhan akhir, tetapi juga pada kontribusi tiap unit dalam mengendalikan beban partikel.

Tabel 3. Matriks titik kendali operasional preventif pada unit pengolahan SPAM Katulampa

Unit proses	Potensi gangguan operasional	Indikator yang dipantau	Tindakan preventif	Peran terhadap stabilitas kekeruhan
Intake	Sampah, lumpur, dan padatan tersuspensi dari air baku	Kondisi visual, sampah pada saringan, kekeruhan	Screening, pembersihan saringan, pemantauan rutin	Mengurangi beban padatan awal
Koagulasi	Dosis tidak sesuai, pencampuran kurang merata	Kekeruhan air baku, dosis, kondisi pencampuran	Penyesuaian dosis dan kontrol pencampuran	Mendukung pembentukan flok awal
Flokulasi	Flok tidak stabil, pecah, atau tidak terbentuk optimal	Ukuran flok, kondisi pengadukan, akumulasi lumpur	Kontrol pengadukan dan pengurasan berkala	Membentuk flok stabil untuk diendapkan
Sedimentasi	Penumpukan lumpur dan terbawanya flok ke filtrasi	Ketebalan lumpur, kejernihan air	Pengurasan rutin dan kontrol beban masuk	Mengurangi beban ke filtrasi
Filtrasi	Penyumbatan media dan penurunan kinerja filter	Kekeruhan hasil, kondisi media, kebutuhan backwash	Backwash berkala dan pemeliharaan media	Menyisihkan partikel halus

Unit proses	Potensi gangguan operasional	Indikator yang dipantau	Tindakan preventif	Peran terhadap stabilitas kekeruhan
Reservoir / Air hasil	Penurunan kualitas sebelum distribusi	Kekeruhan air hasil dan kondisi reservoir	Pemantauan dan pengendalian kualitas akhir	Verifikasi kualitas sebelum distribusi
Operasi keseluruhan	Perubahan air baku dan keterlambatan respons	Data operasional, kekeruhan, debit	Operasi 24 jam, pemantauan dan koordinasi operator	Menjaga kestabilan proses secara umum

Pada unit *intake*, pengendalian difokuskan pada material kasar seperti sampah, lumpur, dan padatan tersuspensi yang dapat meningkatkan beban pengolahan. Tindakan preventif berupa *screening*, pembersihan saringan, dan pemantauan visual berfungsi sebagai pengendalian awal sebelum proses koagulasi. Unit koagulasi dan flokulasi merupakan titik kendali utama karena menentukan pembentukan flok. Gangguan dapat berupa ketidaksesuaian dosis koagulan atau pembentukan flok yang tidak optimal. Pengendalian dilakukan melalui penyesuaian proses, kontrol pencampuran, dan observasi flok. [12] menegaskan pentingnya pengendalian koagulasi dan filtrasi dalam menjaga kekeruhan rendah, sementara [17] menunjukkan bahwa efektivitas proses ini dipengaruhi oleh karakteristik air baku dan kondisi operasi. Pada unit sedimentasi, pengendalian berfokus pada akumulasi lumpur dan pencegahan terbawanya flok ke filtrasi. Pengurasan lumpur rutin dan pengendalian beban padatan menjadi tindakan utama. Studi menunjukkan bahwa kinerja sedimentasi berpengaruh terhadap keberhasilan penurunan kekeruhan sebelum filtrasi [5], [14], [15]. Unit filtrasi berfungsi sebagai pengendali akhir partikel halus. Gangguan meliputi penyumbatan media dan peningkatan kebutuhan *backwash*. Oleh karena itu, *backwash* berkala dan pemeliharaan media menjadi kunci. Evaluasi filter penting karena berperan langsung terhadap kualitas air hasil [18]. Selain itu, kekeruhan dan dosis koagulan memengaruhi frekuensi *backwash* [9], dan proses ini terbukti berpengaruh terhadap kinerja filtrasi [8], [10]. Penguatan pembahasan ini juga didukung oleh [19] yang menunjukkan bahwa kinerja unit filtrasi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional dan pemeliharaan media, sehingga pengendalian preventif pada tahap ini menjadi krusial dalam menjaga stabilitas kekeruhan air hasil. Pada reservoir, pengendalian berfungsi sebagai verifikasi akhir sebelum distribusi. Pemantauan kekeruhan memastikan kualitas air tetap stabil. Hal ini sejalan dengan prinsip *water safety plan* yang menekankan pemantauan pada titik kritis [7].

Selain itu, operasi sistem secara keseluruhan juga berperan penting. SPAM Katulampa beroperasi 24 jam dengan tiga shift, memungkinkan pemantauan kontinu dan respons cepat terhadap perubahan kualitas air baku. Studi menunjukkan bahwa keberhasilan pengolahan tidak hanya ditentukan oleh desain, tetapi juga oleh konsistensi operasi dan pemeliharaan [6], [14], [15]. Secara keseluruhan, titik kendali preventif bekerja secara berurutan dan saling melengkapi, mulai dari *intake*, koagulasi-flokulasi, sedimentasi, filtrasi, hingga reservoir. Keterpaduan ini menjelaskan stabilitas kekeruhan air hasil meskipun air baku berfluktuasi. Dengan demikian, stabilitas tersebut merupakan hasil dari pengendalian operasional preventif secara menyeluruh, bukan dari satu unit proses saja.

Implikasi Operasional dan Keterbatasan Evaluasi

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa stabilitas kekeruhan air hasil pada SPAM Katulampa dipengaruhi oleh keterpaduan proses pengolahan, pemantauan kualitas air, dan tindakan operasional preventif pada unit-unit kritis. Implikasi utamanya adalah bahwa pengelolaan SPAM berbasis air permukaan tidak cukup hanya berfokus pada kualitas air hasil, tetapi juga perlu memperkuat pengendalian sejak air baku hingga distribusi. Hal ini sejalan dengan prinsip penyelenggaraan SPAM yang menekankan aspek kualitas, kuantitas, kontinuitas, dan keterjangkauan [20], serta upaya peningkatan akses air minum aman yang memenuhi aspek keamanan dan kualitas [21].

Secara operasional, penelitian ini menegaskan pentingnya pemantauan rutin dan tindakan preventif pada setiap unit proses. Pada instalasi berbasis air sungai, kualitas air baku dapat berubah cepat, sehingga diperlukan pencatatan kekeruhan air baku dan hasil, debit, penggunaan koagulan, serta kondisi unit sebagai dasar pengambilan keputusan. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *water safety plan* yang menekankan pemantauan dan tindakan korektif untuk mencegah penurunan kualitas air [7]. Data operasional harian dapat menjadi dasar evaluasi awal, namun perlu didukung sistem pemantauan yang lebih rinci untuk mengendalikan risiko saat terjadi fluktuasi air baku. Penguatan dokumentasi operasional juga diperlukan, terutama terkait waktu dan frekuensi *backwash*, pengurasan

unit, kejadian kekeruhan ekstrem, serta kondisi hujan. Dokumentasi ini penting karena kinerja pengolahan tidak hanya ditentukan oleh desain, tetapi juga konsistensi operasi dan pemeliharaan. Studi evaluasi WTP/IPAM menunjukkan bahwa kinerja sistem dipengaruhi oleh kondisi sumber air, debit, kualitas hasil, desain, dan operasi unit [22] - [24]. Dengan pencatatan yang baik, pengelola dapat mengidentifikasi pola gangguan dan menyusun tindakan preventif yang lebih efektif. Dari sisi unit proses, perhatian utama perlu diberikan pada sedimentasi, filtrasi, dan reservoir sebagai pengendali akhir sebelum distribusi. Unit sedimentasi berfungsi menurunkan beban padatan, sedangkan filtrasi menjadi tahap akhir penyisihan partikel halus. Kinerja kedua unit ini sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi, pemeliharaan, dan pengelolaan residu seperti lumpur dan air *backwash* [19], [25]. Oleh karena itu, pengendalian preventif pada unit-unit tersebut penting untuk menjaga kekeruhan air tetap rendah sebelum distribusi. Evaluasi berbasis data lapangan terbukti menjadi pendekatan praktis untuk mengidentifikasi peluang peningkatan kinerja instalasi. Pendekatan ini dapat dilakukan melalui data operasional, observasi, dan wawancara tanpa selalu memerlukan uji laboratorium tambahan pada tahap awal, sebagaimana juga diterapkan dalam kajian evaluasi IPAM [26]. Namun, untuk memahami hubungan sebab-akibat secara lebih kuat, diperlukan pemantauan yang lebih rinci.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Data yang digunakan masih berupa data harian sehingga belum menggambarkan dinamika real-time. Selain itu, belum tersedia log operasional detail terkait *backwash*, pengurasan, perubahan dosis koagulan, dan kejadian hujan. Parameter yang dianalisis juga terbatas pada kekeruhan, sementara parameter lain seperti pH, warna, zat organik, mikrobiologi, dan sisa klor belum dianalisis, padahal diperlukan untuk memenuhi standar kualitas air minum [2]. Penelitian ini juga tidak mencakup uji laboratorium tambahan seperti *jar test*, sehingga belum dapat menentukan dosis optimum koagulan secara eksperimental. Berdasarkan keterbatasan tersebut, evaluasi lanjutan disarankan menggunakan data dengan resolusi waktu lebih tinggi, seperti data per jam atau *online monitoring*, serta dilengkapi catatan operasional yang lebih rinci. Selain itu, analisis parameter kualitas air lain perlu dilakukan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. Dengan demikian, evaluasi operasional dapat berkembang menjadi sistem pemantauan yang lebih adaptif dalam menjaga kualitas air minum secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian operasional preventif berperan penting dalam menjaga stabilitas kekeruhan air hasil pada SPAM Katulampa Kota Bogor. Selama periode 10 Februari–10 Maret 2026, kekeruhan air baku menunjukkan fluktuasi tinggi dengan rata-rata 58,83 NTU, rentang 12,00–262,98 NTU, dan koefisien variasi 88,49%. Sebaliknya, kekeruhan air hasil relatif stabil dengan rata-rata 0,61 NTU, rentang 0,52–0,91 NTU, dan koefisien variasi 16,83%, serta seluruhnya berada di bawah baku mutu 3 NTU. Stabilitas tersebut menunjukkan bahwa sistem pengolahan mampu meredam fluktuasi kekeruhan air baku melalui keterpaduan proses *intake*, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, reservoir, dan operasi keseluruhan. Titik kendali preventif yang berperan meliputi *screening* dan pemantauan air baku, pengendalian proses koagulasi-flokulasi, pengurasan unit sedimentasi dan flokulator, *backwash* serta pemeliharaan media filter, dan pemantauan kualitas air hasil sebelum distribusi. Kelebihan penelitian ini adalah penggunaan pendekatan evaluasi operasional berbasis data lapangan yang menghasilkan matriks titik kendali preventif sebagai rekomendasi praktis bagi pengelola SPAM. Namun, penelitian ini masih terbatas pada data harian, parameter kekeruhan, dan belum dilengkapi data real-time, log operasional rinci, maupun uji laboratorium tambahan. Pengembangan selanjutnya perlu mencakup pemantauan per jam atau *online monitoring*, pencatatan detail *backwash*, pengurasan, kejadian hujan, perubahan dosis koagulan, serta analisis parameter kualitas air lain seperti pH, warna, mikrobiologi, sisa klor, dan zat organik agar evaluasi pengendalian risiko air minum menjadi lebih komprehensif.

REFERENSI

- [1] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2016 Tahun 2016 tentang Penyelenggaraan Sistem Penyediaan Air Minum," Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, Jakarta, 2016, Link: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/104463/permen-pupr-no-27-tahun-2016>
- [2] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan," Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, Jakarta, 2023, Link: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/245563/permenkes-no-2-tahun-2023>
- [3] W. H. Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2017.
- [4] A. Water Works Association, "Operational Control of Coagulation and Filtration Processes AWWA MANUAL M37 Third Edition," 2011.
- [5] R. G. E. Bhaskoro and T. E. Ramadhan, "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Minum (Ipam) Karangpilang I Pdam Surya Sembada Kota Surabaya Secara Kuantitatif," *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 15, no. 2, pp. 62-68, 2018, Link: <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v15i2.62-68>
- [6] R. P. Utami and A. D. Radityaningrum, "Kinerja Sistem Pengolahan Air Bersih Di Instalasi Pengolahan Air li Ngares, Kabupaten Trenggalek," *ENVITATS (Environmental Engineering Journal ITATS)*, vol. 1, pp. 35-43, 2021, Link: <https://doi.org/10.31284/j.envitats.2021.v1i1.2178>
- [7] World Health Organization and International Water Association, *Water Safety Plan Manual: Step-by-step Risk Management for Drinking-water Suppliers*, 2nd ed. Geneva: World Health Organization, 2023, Link: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240067691>
- [8] B. D. Marsono, "Evaluasi Kinerja Filter Cepat Di Pdam Sidoarjo Dengan Metoda Filter Coring," *Jurnal Purifikasi*, vol. 16, no. 2, 2016, Link: <https://doi.org/10.12962/j25983806.v16i2.42>
- [9] R. Kurniawan, R. Purnaini, and K. Utomo, "Pengaruh Kekeruhan Dan Dosis Koagulan Terhadap Waktu Pencucian Filter (Backwash) Unit Filtrasi IPA V Perumda Air Minum Tirta Khatulistiwa," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, vol. 11, no. 1, pp. 26-33, 2023, Link: <https://doi.org/10.26418/jtlb.v11i1.57191>
- [10] S. M. Sari and R. Rinawati, "Analisis Pengaruh Backwash Terhadap Pengolahan Air Bersih Di Water Treatment Plant (WTP) 1 PDAM Way Rilau Bandar Lampung," *Analit: Analytical and Environmental Chemistry*, vol. 6, no. 2, pp. 198-208, 2021, Link: <https://analit.fmipa.unila.ac.id/index.php/analit/article/view/51>
- [11] World Health Organization, *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum*, 4th ed. Geneva: World Health Organization, 2017, Link: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- [12] American Water Works Association, *Operational Control of Coagulation and Filtration Processes*, 3rd ed. Denver, CO: American Water Works Association, 2011, Link: <https://store.awwa.org/M37-Operational-Control-of-Coagulation-and-Filtration-Processes-Third-Edition>
- [13] American Water Works Association, *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2011, Link: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071630115>
- [14] B. Reynaldi and A. D. Radityaningrum, "Evaluasi Sistem Instalasi Pengolahan Air Minum Di Perusahaan Umum Daerah Air Minum Maja Tirta Kota Mojokerto," *ENVITATS (Environmental Engineering Journal ITATS)*, vol. 2, no. 1, pp. 35-44, 2022, Link: <https://doi.org/10.31284/j.envitats.2022.v2i1.2900>
- [15] P. S. Komala, A. Nur, and I. R. Fitria, "Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Minum (IPA) Universitas Andalas," *Dampak*, vol. 21, no. 2, pp. 7-17, 2024, Link: <https://doi.org/10.25077/dampak.21.2.7-17.2024>

- [16] F. Z. Harun, F. K. Rahmawati, and N. I. R. Umadji, "Analisis Parameter Kekerusuhan Pada Sistem Pengolahan Air Baku di Kota Gorontalo," *Journal of Environmental Engineering Research*, 2025. Link: <https://jurnal.unugo.ac.id/jeer/index.php/jeer/article/view/75>
- [17] M. R. Sururi and Hardika, "Penyisihan Kekerusuhan dan Natural Organic Matter (NOM) pada Unit Koagulasi-Flokulasi Instalasi Pengolahan Air Minum di Asia Tenggara: Studi Literatur," *Jurnal Reka Lingkungan*, vol. 12, no. 1, pp. 63–79, 2024, Link: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/lingkungan/article/view/10738>
- [18] A. Camellia and B. Marsono, "Evaluasi Kinerja Unit Filter IPAM Karangpilang III PDAM Surya Sembada Kota Surabaya," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 9, no. 2, 2021, Link: <https://www.neliti.com/publications/507969/evaluasi-kinerja-unit-filter-ipam-karangpilang-iii-pdam-surya-sem-bada-kota-surab>
- [19] R. Rahmawati and A. Amalia, "Perbandingan Efektivitas Unit Filtrasi pada Instalasi Pengolahan Air Unit III dan IV Legundi Gresik," *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 6, pp. 397–407, 2024, Link: <https://doi.org/10.52005/teslink.v6i2.391>
- [20] Pemerintah Republik Indonesia, "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 122 Tahun 2015 tentang Sistem Penyediaan Air Minum," Pemerintah Republik Indonesia, Jakarta, 2015, Link: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/5701/pp-no-122-tahun-2015>
- [21] World Health Organization, "Meningkatkan Akses Air Minum Aman di Indonesia," 2021, *World Health Organization, Indonesia*, Link: <https://www.who.int/indonesia/id/news/detail/15-11-2021-improving-access-to-safe-drinking-water-in-indonesia>
- [22] M. Kencanawati, Mustakim "Analisis Pengolahan Air Bersih Pada WTP PDAM Prapatan Kota Balikpapan," *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil: TRANSUKMA*, vol. 2, no. 2, pp. 103-117, 2017, Link: <https://transukma.uniba-bpn.ac.id/index.php/transukma/article/view/51>
- [23] E. Afiatun, S. Wahyuni, and S. Merinda, "Strategi Optimasi Pemanfaatan Sumber Air Bantar Awi Sungai Cikapundung Terhadap Instalasi Pengolahan Air Minum Dago Pakar," *Journal of Community Based Environmental Engineering and Management*, vol. 2, no. 2 pp. 51-60, 2019, Link: <https://doi.org/10.23969/jcbeem.v2i2.1457>
- [24] A. Darmawan and A. Amalia, "Analisis Kinerja Instalasi Pengolahan Air Unit IV Di PDAM Legundi Gresik," *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 387–396, 2024, Link: <https://doi.org/10.52005/teslink.v6i2.392>
- [25] N. Putri and A. Amalia, "Analisis Kinerja dan Evaluasi Unit Clearator dan Clarifier di PDAM Surya Sembada Surabaya," *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 6, no. 1, pp. 62–68, 2024, Link: <https://doi.org/10.52005/teslink.v6i1.318>
- [26] L. Q. Adlaa, S. Nengse, R. D. N. Setyowati, and W. Nilandita, "Kajian Efisiensi Penyisihan Unit IPAM Karangpilang III PDAM Surya Sembada Kota Surabaya," *Jurnal Rekayasa Hijau*, vol. 9, no. 1, pp. 32–43, 2025, Link: <https://doi.org/10.26760/jrh.v9i1.32-43>