EnviroScienteae Vol. 22 No. 3, Agustus 2026 ISSN 2302-3708 (online)
Halaman 8-16

EFEKTIVITAS DAN EFISIENSI BIAYA KOMBINASI KOAGULAN *POLY ALUMINIUM CHLORIDE* (PAC) – TAWAS PADA TAHAP KOAGULASI–FLOKULASI AIR BAKU PT AIR MINUM TABALONG BERSINAR

Effectiveness and Cost Efficiency of Poly Aluminium Chloride (PAC)–Alum Coagulant Combinations during the Coagulation–Flocculation Stage of Raw Water Treatment at PT Air Minum Tabalong Bersinar

M Ali Hasymi[1)], Agung Nugroho[2)], Akhmad Rizali Saidy[3)], Eko Rini Indrayatie[4)]

[1)] *Program Studi Magister Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia/hasymializky@gmail.com*

[2)] *Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia/anugroho@ulm.ac.id*

[3)] *Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia/asaidy@ulm.ac.id*

[4)] *Fakultas Kehutanan Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia/erindrayatie@ulm.ac.id*

Abstract

The Tabalong River is a raw water source for PT Air Minum Tabalong Bersinar and experiences substantial fluctuations in quality, especially during the rainy season. This study evaluated the technical effectiveness and cost-efficiency of polyaluminium chloride (PAC), alum, and their combinations during the coagulation–flocculation stage. A laboratory experiment was conducted using the jar test method in two stages. In the first stage, optimal operational doses of PAC and alum were determined by varying doses from 0–25 mg/L and setting a turbidity target of ≤5 NTU. In the second stage, five PAC:alum formulations, namely 100:0, 75:25, 50:50, 25:75, and 0:100, were tested. PAC and alum stock solutions were prepared at 2% w/v (20 mg/mL) and dosed into 1-L raw-water samples. Based on optimum doses of 10 mg/L PAC and 15 mg/L alum, the 75:25 formulation contained 7.50 mg/L PAC and 3.75 mg/L alum, corresponding to 0.375 mL/L PAC stock and 0.188 mL/L alum stock. The 75:25 formulation produced the best performance, reducing turbidity by 98.2%, colour by 100%, TSS by 90.3%, Fe by 90.8%, Mn by 88.9%, and E. coli by at least 97.8%, while maintaining pH at 7.18. Its final values were 2.27 NTU, 0 TCU, 15.40 mg/L TSS, 0.06 mg/L Fe, 0.06 mg/L Mn, and 22 MPN/100 mL E. coli. The coagulant cost was IDR 144/m³. This formulation provided the best balance between technical performance and coagulant cost; however, the treated water still required sedimentation, filtration, and disinfection to meet final drinking-water requirements under the tested conditions.

Keywords: alum; coagulation–flocculation; coagulant cost; jar test; poly aluminium chloride; raw water

PENDAHULUAN

Ketersediaan air baku dengan karakteristik yang dapat diolah merupakan faktor penting dalam keberlanjutan pelayanan air minum. Air baku yang bersumber dari sungai umumnya mengalami fluktuasi kualitas akibat

perubahan musim, debit aliran, limpasan permukaan, erosi tanah, serta aktivitas permukiman, pertanian, perkebunan, pertambangan, dan industri di sepanjang daerah aliran sungai. Fluktuasi tersebut dapat meningkatkan beban unit pengolahan, kebutuhan bahan kimia, produksi lumpur, dan biaya pengoperasian instalasi. Perlindungan dan pengelolaan mutu air diatur melalui Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, sedangkan persyaratan akhir kualitas air minum mengacu pada Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Namun, pencapaian kualitas air minum merupakan hasil keseluruhan rangkaian proses, yang meliputi koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi. Penelitian ini hanya mengevaluasi tahap koagulasi–flokulasi dan tidak menilai seluruh rangkaian pengolahan sampai menghasilkan air minum siap konsumsi.

Sungai Tabalong merupakan salah satu sumber air baku utama bagi PT Air Minum Tabalong Bersinar. Kualitas air sungai tersebut dipengaruhi oleh aktivitas pertambangan batubara, perkebunan, pertanian, permukiman, dan limpasan lahan, yang dapat meningkatkan kekeruhan, warna, total suspended solids (TSS), besi (Fe), mangan (Mn), serta cemaran *Escherichia coli*. Hasil pemantauan kualitas air menunjukkan bahwa beberapa parameter memiliki konsentrasi relatif tinggi, terutama pada musim penghujan ketika limpasan permukaan membawa sedimen, bahan organik, dan kontaminan ke badan air. Kondisi tersebut meningkatkan beban tahap koagulasi–flokulasi dan unit pengolahan berikutnya. Dalam penelitian ini, TSS digunakan sebagai indikator beban padatan tersuspensi, sedangkan persyaratan kualitas air minum digunakan sebagai referensi mutu akhir yang harus dicapai oleh keseluruhan instalasi.

Koagulasi dan flokulasi merupakan tahapan penting dalam pengolahan air baku sungai untuk mendestabilisasi partikel koloid dan membentuk flok yang lebih besar sehingga mudah dipisahkan. Koagulasi berlangsung melalui netralisasi muatan partikel, sedangkan flokulasi memperbesar flok melalui tumbukan antarpartikel. Flok yang terbentuk selanjutnya dipisahkan melalui sedimentasi dan filtrasi, sedangkan pengendalian akhir mikroorganisme dilakukan melalui disinfeksi. Poly aluminium chloride (PAC) dan tawas merupakan koagulan yang umum digunakan. PAC umumnya bekerja pada rentang pH yang lebih luas dan dapat membentuk flok dengan cepat, sedangkan tawas relatif lebih murah tetapi dapat menurunkan pH dan membutuhkan dosis lebih besar pada kondisi air baku tertentu. Oleh karena itu, efektivitas kedua koagulan perlu dinilai berdasarkan konsentrasi akhir, persentase penyisihan parameter, kestabilan pH, dan kebutuhan dosis.

Kombinasi PAC dan tawas berpotensi memberikan keseimbangan antara kinerja pembentukan flok dan biaya penggunaan koagulan. Namun, pemilihan formulasi tidak dapat hanya didasarkan pada biaya terendah karena perlakuan yang paling murah belum tentu memberikan penurunan kekeruhan dan TSS terbaik. Dalam penelitian ini, efektivitas teknis dinilai berdasarkan perubahan pH, konsentrasi akhir, dan persentase penyisihan kekeruhan, warna, TSS, Fe, Mn, dan *Escherichia coli*. Efisiensi biaya dibatasi pada biaya penggunaan koagulan dalam satuan rupiah per meter kubik air baku dan tidak mencakup seluruh biaya produksi air minum. Penelitian terdahulu lebih banyak mengevaluasi PAC dan tawas secara tunggal, sedangkan kajian kombinasi keduanya pada air baku Sungai Tabalong yang mengintegrasikan kinerja teknis dan biaya koagulan masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik awal air baku Sungai Tabalong; (2) menentukan dosis optimum operasional PAC dan tawas secara tunggal pada tahap koagulasi–flokulasi; (3) menganalisis efektivitas PAC, tawas, dan kombinasi PAC–tawas dalam menurunkan kekeruhan, warna, TSS, Fe, Mn, dan *Escherichia coli* serta mempertahankan pH

proses; (4) menganalisis efisiensi biaya penggunaan koagulan dalam satuan Rp/m³ air baku; dan (5) menentukan formulasi terpilih berdasarkan keseimbangan antara efektivitas teknis dan biaya penggunaan koagulan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) satu faktor, yaitu variasi jenis dan dosis koagulan. Variabel terikat adalah kualitas air hasil pengolahan (pH, kekeruhan, warna, TSS, Fe terlarut, Mn terlarut, dan Escherichia coli). Penelitian dilaksanakan pada Maret–Mei 2026. Sampel air baku diambil di intake PDAM Tabalong yang memanfaatkan Sungai Tabalong sesuai SNI 6989.57:2008, sedangkan seluruh pengujian dilakukan di UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Tabalong.

Peralatan utama meliputi jar test (VELP Scientifica JLT-6), pH meter, turbidimeter, pocket colorimeter, oven dan neraca analitik, serta Spektrofotometer Serapan Atom (SSA). Bahan yang digunakan meliputi air baku Sungai Tabalong, PAC, tawas, akuades, media LBDS/LBSS/BGLB untuk uji Most Probable Number (MPN), dan asam nitrat pekat. Larutan stok masing-masing koagulan dibuat pada konsentrasi 2% (b/v), mengadopsi Sutoyo Silitonga *et al*. (2019) dengan modifikasi.

Prosedur dilaksanakan dalam dua tahap yang mengacu pada Muruganandam *et al*. (2017) dengan modifikasi waktu pengendapan. Setiap perlakuan menggunakan 1.000 mL sampel dengan pengadukan cepat 150 rpm selama 2 menit, pengadukan lambat 35 rpm selama 20 menit, dan pengendapan 30 menit. Tahap pertama menentukan dosis optimum PAC dan tawas secara terpisah pada variasi 0, 5, 10, 15, 20, dan 25 ppm; dosis optimum ditetapkan sebagai dosis minimum yang mampu mencapai kekeruhan ≤5 NTU sesuai standar operasional PDAM. Tahap kedua menggunakan dosis optimum masing-masing koagulan, yaitu PAC 10 mg/L dan tawas 15 mg/L. Formulasi 100:0 terdiri atas PAC 10,00 mg/L; 75:25 terdiri atas PAC 7,50 mg/L dan tawas 3,75 mg/L; 50:50 terdiri atas PAC 5,00 mg/L dan tawas 7,50 mg/L; 25:75 terdiri atas PAC 2,50 mg/L dan tawas 11,25 mg/L; sedangkan 0:100 terdiri atas tawas 15,00 mg/L. Dengan larutan stok 2% b/v atau 20 mg/mL, volume stok yang dibubuhkan per liter sampel masing-masing adalah 0,500; 0,375 + 0,188; 0,250 + 0,375; 0,125 + 0,563; dan 0,750 mL. Formulasi kombinasi disusun berdasarkan persentase dosis optimum masing-masing koagulan sehingga total dosis berbeda antarperlakuan. Oleh karena itu, hasil penelitian menggambarkan kinerja masing-masing formulasi, tetapi belum sepenuhnya memisahkan pengaruh rasio PAC:tawas dari pengaruh total dosis.

Pengujian parameter mengacu pada metode standar, yaitu pH secara elektrometri (SNI 6989.11:2019), kekeruhan secara nefelometri (SNI 06-6989.25:2005), warna secara kolorimetri (SNI 6989.80:2011), TSS secara gravimetri (SNI 06-6989.3:2019), Fe dan Mn terlarut menggunakan SSA (SNI 6989.84:2019), serta Escherichia coli dengan metode MPN (SNI 6774:2008). Efektivitas dinyatakan sebagai efisiensi penyisihan, $E = ((T_0 - T_1)/T_0) \times 100\%$, dengan T_0 dan T_1 berturut-turut adalah nilai parameter sebelum dan sesudah perlakuan.

Data dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif. Efektivitas perlakuan ditentukan berdasarkan konsentrasi akhir dan persentase penyisihan kekeruhan, warna, TSS, Fe, Mn, dan Escherichia coli, sedangkan pH dianalisis berdasarkan perubahan nilainya karena merupakan parameter logaritmik. Perbedaan antarformulasi dianalisis menggunakan one-way analysis of variance pada taraf signifikansi 5% (α=0,05). Jika hasil ANOVA menunjukkan perbedaan nyata ($p<0,05$), analisis dilanjutkan dengan uji Tukey. Kinerja tahap koagulasi–flokulasi

dinilai berdasarkan nilai akhir parameter, persentase penyisihan, dan target operasional kekeruhan ≤5 NTU. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 digunakan sebagai acuan mutu akhir air minum, bukan sebagai satu-satunya kriteria keberhasilan jar test. Analisis biaya dilakukan berdasarkan kebutuhan koagulan menggunakan persamaan $X=(Q\times D)/10^6$, dengan X sebagai kebutuhan koagulan (kg/jam), Q sebagai debit air (L/jam), dan D sebagai dosis koagulan (mg/L), kemudian dikonversi menjadi biaya penggunaan koagulan per jam dan per meter kubik air baku

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Awal Air Baku Sungai Tabalong

Pengambilan sampel dilakukan pada musim penghujan yang merepresentasikan kondisi kualitas air pada skenario terburuk sehingga relevan untuk mengkaji efektivitas pengolahan (Ginting *et al*., 2022).

Air baku Sungai Tabalong memiliki nilai kekeruhan, warna, Fe, Mn, dan *Escherichia coli* yang relatif tinggi sehingga menunjukkan besarnya beban pengolahan pada tahap koagulasi–flokulasi dan unit proses berikutnya. TSS digunakan sebagai indikator besarnya kandungan padatan tersuspensi dalam air baku karena tidak ditetapkan nilai ambang khusus dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023.

Dosis Optimum Koagulan Tunggal

Optimalisasi bertujuan menentukan dosis minimum yang mampu menurunkan kekeruhan hingga memenuhi standar operasional PDAM (≤5 NTU) sebelum pengolahan lanjutan. Hasil optimalisasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Efektifitas Penurunan Kekeruhan dan Penentuan Dosis Optimum Operasional PAC Dan Tawas

Dosis (mg/L)	PAC (NTU)	Ef. (%)	Tawas (NTU)	Ef. (%)
0	125	0	125	0
5	7,24	94,20	15,2	87,86
10	4,05	96,75	7,19	94,24
15	3,29	97,37	4,52	96,37
20	2,17	98,26	2,25	98,20
25	3,96	96,83	3,88	96,89

Sumber: Hasil uji Laboratorium (rata-rata empat ulangan)

Dosis PAC 10 mg/L dan Tawas 15 mg/L ditetapkan sebagai dosis optimum operasional karena keduanyan merupakan dosis terendah yang mampu mencapai target kekeruhan setelah proses koagulasi–flokulasi sebesar ≤5 NTU. Pada dosis tersebut, PAC menurunkan kekeruhan dari 125 NTU menjadi 4,05 NTU dengan efektivitas 96,75%, sedangkan tawas menurunkan kekeruhan menjadi 4,52 NTU dengan efektivitas 96,37%.

Meskipun peningkatan dosis menjadi 20 ppm menurunkan kekeruhan lebih jauh, tambahan penurunan tersebut tidak sebanding dengan tambahan penggunaan koagulan sehingga dipilih dosis minimum yang efisien. PAC menunjukkan kinerja koagulasi lebih baik karena mencapai target pada dosis lebih rendah, mengindikasikan kemampuannya mendestabilisasi partikel koloid dan membentuk flok yang padat serta mudah mengendap. Dosis optimum PAC 10 mg/L dan Tawas 15 mg/L digunakan sebagai dasar penyusunan kombinasi pada tahap berikutnya.

Efektivitas Kombinasi PAC–Tawas

Kombinasi PAC dan tawas diuji pada lima nisbah menggunakan dosis optimum masing-masing. Pengaruh kombinasi terhadap ketujuh parameter kualitas air disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Air Baku Setelah Proses Koagulasi-Flokulasi Pada Berbagai Kombinasi PAC-Tawas

Kombinasi PAC:tawas	pH	Kekeruhan (NTU)	Warna (TCU)	TSS (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	E. coli (MPN/100 mL)
0:0 (kontrol)	7,30	125	50	158,23	0,65	0,54	≥979
100:0	7,17	3,03	8	27,68	0,07	0,07	21
75:25	**7,18**	**2,27**	**0**	**15,40**	**0,06**	**0,06**	**22**
50:50	6,98	3,52	5	31.58	0,06	0,06	27
25:75	6,88	4,51	5	42,35	0,08	0,08	67
0:100	6,83	4,79	10	46,00	0,08	0,08	84

Catatan: Seluruh nilai merupakan hasil jar test pada tahap koagulasi–flokulasi. Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 digunakan sebagai acuan mutu akhir air minum. TSS menunjukkan beban padatan tersuspensi, Fe dan Mn menunjukkan beban logam, sedangkan Escherichia coli menunjukkan beban mikrobiologi yang masih memerlukan proses pengolahan lanjutan.

Sumber: Hasil uji Lab. Lingkungan DLH Kab. Tabalong (rata-rata empat ulangan)

Nilai pH air baku sebelum perlakuan sebesar 7,30, sedangkan setelah perlakuan PAC, tawas, dan kombinasinya berada pada kisaran 6,83–7,18. Seluruh nilai tersebut masih berada dalam rentang pH 6,5–8,5 yang digunakan sebagai referensi mutu akhir air minum. Namun, dalam penelitian ini pH terutama berfungsi sebagai parameter proses karena memengaruhi hidrolisis koagulan, pembentukan spesies aluminium, destabilisasi partikel, dan pembentukan flok. Menurut El-Taweel *et al.* (2023), hidrolisis koagulan berbasis aluminium dapat melepaskan ion hidrogen dan mengonsumsi alkalinitas air sehingga menyebabkan penurunan pH. Penurunan pH yang lebih besar pada perlakuan dengan proporsi tawas lebih tinggi juga sejalan dengan temuan Marlinda *et al*. (2023) bahwa penggunaan aluminium sulfat dapat menurunkan pH lebih kuat dibandingkan PAC pada kondisi tertentu.. Uji one-way ANOVA menunjukkan bahwa variasi formulasi koagulan berpengaruh nyata terhadap pH ($p<0,05$). Meskipun demikian, perbedaan tersebut harus ditafsirkan sebagai perubahan kondisi proses, bukan sebagai persentase penyisihan, karena pH merupakan parameter logaritmik. Seluruh perlakuan masih menghasilkan pH yang mendukung proses koagulasi–flokulasi.

Kekeruhan air baku sebesar 125 NTU menurun menjadi 2,27–4,79 NTU setelah perlakuan. Efektivitas tertinggi diperoleh pada formulasi PAC:tawas 75:25, yang menurunkan kekeruhan menjadi 2,27 NTU atau sebesar 98,18%, diikuti PAC tunggal dengan kekeruhan 3,03 NTU atau efektivitas 97,58%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa formulasi 75:25 menghasilkan nilai rata-rata kekeruhan terendah di antara perlakuan yang diuji. Menurut El-Taweel *et al*. (2023), penurunan kekeruhan pada proses koagulasi–flokulasi terjadi melalui netralisasi muatan partikel koloid, pembentukan endapan aluminium hidroksida, serta pemerangkapan partikel di dalam flok. Tsoutsa *et al.* (2024) juga menjelaskan bahwa efektivitas koagulan dipengaruhi oleh jenis koagulan, dosis, pH, alkalinitas, dan karakteristik partikel dalam air. Oleh karena itu, penurunan kinerja pada formulasi dengan proporsi tawas lebih tinggi diduga berkaitan dengan perubahan total dosis koagulan, pH, bentuk spesies aluminium, dan karakteristik flok. Karena ukuran flok, kekuatan flok, zeta potential, dan alkalinitas tidak diukur, mekanisme tersebut tidak dapat dinyatakan secara pasti. Hasil ANOVA menunjukkan adanya perbedaan nyata antar formulasi ($p<0,05$). Namun, formulasi 75:25 menghasilkan rata-rata kekeruhan terendah dan berbeda nyata dengan beberapa formulasi yang memiliki proporsi tawas lebih tinggi.

Warna air baku sebesar 50 TCU menurun menjadi 0–10 TCU setelah perlakuan. Formulasi PAC:tawas 75:25 memberikan penurunan tertinggi, yaitu dari 50 TCU menjadi 0 TCU atau efektivitas sebesar 100%. Penurunan warna menunjukkan bahwa koagulasi–flokulasi mampu menyisihkan senyawa berwarna yang berasosiasi dengan bahan organik terlarut, partikel koloid, dan senyawa logam. Menurut Koul *et al*. (2022), penyisihan warna melalui koagulasi dapat berlangsung melalui netralisasi muatan, adsorpsi pada endapan hidroksida logam, dan pemerangkapan bahan berwarna ke dalam flok. El-Taweel *et al*. (2023) juga menjelaskan bahwa endapan $Al(OH)_3$ yang terbentuk selama hidrolisis koagulan dapat mengadsorpsi partikel koloid dan senyawa organik. Oleh karena itu, penurunan warna dalam penelitian ini diduga terjadi melalui adsorpsi dan pemerangkapan bahan berwarna pada flok aluminium hidroksida.

Nilai TSS menurun dari 158,23 mg/L menjadi 15,40–46,00 mg/L. Efektivitas tertinggi diperoleh pada formulasi PAC:tawas 75:25 sebesar 90,27%, dengan konsentrasi akhir 15,40 mg/L. Penurunan TSS menunjukkan keberhasilan koagulan dalam mendestabilisasi partikel tersuspensi dan membentuk flok yang dapat dipisahkan melalui pengendapan.

Menurut Kurniawan *et al.* (2020), proses koagulasi–flokulasi menurunkan TSS melalui agregasi partikel halus menjadi flok yang lebih besar dan mudah dipisahkan. Tsoutsa *et al*. (2024) juga menyatakan bahwa kinerja penyisihan padatan tersuspensi dipengaruhi oleh komposisi koagulan, dosis, pH, dan karakteristik air. Formulasi 75:25 menunjukkan kinerja gabungan terbaik pada kondisi penelitian ini, tetapi istilah "efek sinergis" sebaiknya dihindari karena tidak dilakukan pengujian khusus untuk membuktikan sinergisme. Pada formulasi dengan proporsi tawas lebih tinggi, efektivitas TSS menurun menjadi sekitar 80,04% pada rasio 50:50, 73,24% pada rasio 25:75, dan 70,93% pada tawas tunggal. Penurunan tersebut diduga berkaitan dengan perubahan komposisi, total dosis koagulan, pH, dan karakteristik flok. Karena sifat flok tidak diukur langsung, pernyataan bahwa flok tawas lebih ringan dan kurang stabil perlu ditulis sebagai dugaan. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa formulasi koagulan berpengaruh nyata terhadap nilai TSS setelah proses koagulasi–flokulasi ($p<0,05$). Berdasarkan uji lanjut Tukey, formulasi PAC:tawas 75:25 menghasilkan rata-rata TSS terendah dan berbeda nyata dibandingkan seluruh formulasi lainnya.

Konsentrasi Fe menurun dari 0,65 mg/L menjadi 0,06–0,08 mg/L, sedangkan Mn menurun dari 0,54 mg/L menjadi 0,06–0,08 mg/L. Formulasi PAC:tawas 75:25 menghasilkan Fe sebesar 0,06 mg/L dengan efektivitas 90,77% dan Mn sebesar 0,06 mg/L dengan efektivitas 88,89%.

Menurut Krupińska (2021), penurunan Fe pada proses koagulasi dapat berlangsung melalui adsorpsi pada flok aluminium hidroksida, kopresipitasi, dan pengikatan senyawa besi yang berasosiasi dengan bahan organik. Wang *et al*. (2015) juga menjelaskan bahwa flok $Al(OH)_3$ memiliki luas permukaan yang dapat mengadsorpsi berbagai kontaminan selama proses koagulasi. Dengan demikian, penurunan Fe dan Mn dalam penelitian ini diduga terjadi karena sebagian logam berasosiasi dengan partikel tersuspensi, teradsorpsi pada flok, atau mengalami kopresipitasi. Namun, menurut World Health Organization (2022), penyisihan Fe dan terutama Mn secara menyeluruh sering tetap memerlukan oksidasi, sedimentasi, dan filtrasi. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat ditafsirkan sebagai pengurangan beban Fe dan Mn pada tahap koagulasi–flokulasi, bukan sebagai penyisihan akhir dalam proses pengolahan air minum..

Jumlah *Escherichia coli* menurun dari ≥979 MPN/100 mL menjadi 21–84 MPN/100 mL. Nilai terendah diperoleh pada PAC tunggal sebesar 21 MPN/100 mL, sedangkan formulasi PAC:tawas 75:25

menghasilkan 22 MPN/100 mL. Karena nilai awal dinyatakan sebagai ≥979 MPN/100 mL, efektivitas penyisihan tidak dapat dinyatakan sebagai nilai pasti. Efektivitas minimum pada formulasi 75:25 adalah ≥97,75%, sedangkan pada PAC tunggal sebesar ≥97,85%.

Menurut Mirzaiy *et al.* (2012), koagulasi menggunakan PAC dapat mengurangi bakteri koliform melalui adsorpsi dan pemerangkapan sel mikroorganisme di dalam flok. World Health Organization (2004) menjelaskan bahwa koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi dapat menurunkan jumlah mikroorganisme dengan menghilangkan partikel yang membawa atau melindungi mikroorganisme. Penurunan E. coli dalam penelitian ini diduga terjadi karena sel bakteri teradsorpsi pada flok dan terperangkap melalui mekanisme sweep flocculation, kemudian ikut terpisahkan selama pengendapan. Meskipun demikian, koagulasi–flokulasi bukan proses disinfeksi. Menurut World Health Organization (2022), penghilangan mikroorganisme secara menyeluruh memerlukan kombinasi proses klarifikasi, filtrasi, dan disinfeksi. Oleh karena itu, keberadaan E. coli sebesar 21–84 MPN/100 mL setelah jar test tidak menunjukkan kegagalan koagulasi–flokulasi, tetapi menunjukkan bahwa air masih memerlukan proses sedimentasi, filtrasi, dan disinfeksi

Efisiensi Biaya Penggunaan Koagulan

Analisis biaya mengintegrasikan dosis koagulan, efisiensi penurunan kekeruhan, dan biaya penggunaan koagulan untuk menentukan kondisi paling optimum secara teknis dan ekonomis (Tabel 4).

Tabel 4. Perbandingan Kekeruhan dan Biaya Koagulan Pada Berbagai Formulasi PAC-Tawas

Kombinasi PAC:tawas	Pemakaian koagulan (kg/jam)	Biaya (Rp/jam)	Biaya (Rp/m³)	Kekeruhan (NTU)
100:0	3,60	54.540	152	3,03
75:25	**4,05**	**51.764**	**144**	**2,27**
50:50	4,50	46.856	130	3,52
25:75	4,95	39.817	111	4,51
0:100	5,40	30.645	85	4,79

Sumber: Hasil perhitungan (Lampiran tesis)

Peningkatan proporsi tawas menurunkan biaya penggunaan koagulan, tetapi diikuti oleh peningkatan kekeruhan setelah perlakuan. Formulasi PAC:tawas 75:25 menghasilkan kekeruhan terendah sebesar 2,27 NTU dengan biaya Rp144/m³, lebih rendah daripada PAC tunggal sebesar Rp152/m³ tetapi lebih tinggi daripada formulasi lainnya. Dengan demikian, formulasi 75:25 dipilih bukan karena memiliki biaya terendah, melainkan karena memberikan keseimbangan terbaik antara efektivitas penurunan kekeruhan dan biaya penggunaan koagulan pada tahap koagulasi–flokulasi.

KESIMPULAN

1. Air baku Sungai Tabalong pada saat penelitian memiliki pH 7,30, kekeruhan 125 NTU, warna 50 TCU, TSS 158,23 mg/L, Fe 0,65 mg/L, Mn 0,54 mg/L, dan Escherichia coli ≥979 MPN/100 mL.
2. Dosis optimum operasional koagulan tunggal pada tahap koagulasi–flokulasi adalah 10 mg/L untuk PAC dan 15 mg/L untuk tawas. Pada dosis tersebut, efektivitas penurunan kekeruhan masing-masing sebesar 96,75% dan 96,37%.
3. Formulasi PAC:tawas 75:25 memberikan efektivitas teknis tertinggi terhadap

sebagian besar parameter yang diuji, dengan pH 7,18, kekeruhan 2,27 NTU, warna 0 TCU, TSS 15,40 mg/L, Fe 0,06 mg/L, Mn 0,06 mg/L, dan Escherichia coli 22 MPN/100 mL. Efektivitas penurunannya sebesar 98,18% untuk kekeruhan, 100% untuk warna, 90,27% untuk TSS, 90,77% untuk Fe, 88,89% untuk Mn, dan sekurang-kurangnya 97,75% untuk Escherichia coli.

4. Biaya penggunaan koagulan pada formulasi PAC:tawas 75:25 adalah Rp144/m³, lebih rendah daripada PAC tunggal sebesar Rp152/m³ dan lebih tinggi daripada tawas tunggal sebesar Rp85/m³.
5. Formulasi PAC:tawas 75:25 merupakan formulasi terpilih karena memberikan keseimbangan terbaik antara efektivitas teknis dan biaya penggunaan koagulan pada kondisi air baku yang diuji.

DAFTAR PUSTAKA

El-Taweel, R. M., Mohamed, N., Farag, S., & El-Aziz, M. A. (2023). A review of coagulation explaining its definition, mechanism, coagulant types, and optimization models: RSM and ANN. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 6, 100358. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100358

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan.

Koul, B., Yadav, D., Singh, S., Kumar, M., & Song, M. (2022). Application of natural coagulants in water treatment: A sustainable alternative to chemicals. Water, 14(22), 3751. https://doi.org/10.3390/w14223751

Krupińska, I. (2021). Removing iron and organic substances from water over the course of its treatment with the application of average and highly alkaline polyaluminium chlorides. Molecules, 26(5), 1367. https://doi.org/10.3390/molecules26051367

Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., Ismail, N. I., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Purwanti, I. F. (2020). Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(24), 9312. https://doi.org/10.3390/ijerph17249312

Marlinda, M., Hartati, R., Hidjrawan, Y., & Kasmawati, K. (2023). Optimalisasi penjernihan air PDAM Tirta Meulaboh menggunakan aluminium sulfat (tawas) dan poly aluminium chloride (PAC). Jurnal Optimalisasi, 9(1), 24–30.

Mirzaiy, A., Takdastan, A., Alavi, N., & Mohamadian, H. (2012). Removal of turbidity, organic matter, coliform and heterotrophic bacteria by coagulant poly aluminium chloride from Karoon River water in Iran. Asian Journal of Chemistry, 24(6), 2389–2393.

Muruganandam, L., Kumar, M. P. S., Jena, A., Gulla, S., & Godhwani, B. (2017). Treatment of wastewater by coagulation and flocculation using biomaterials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263(3), 032006. https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032006

Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021

tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Rizki, Z., Syahnita, H., & Rahmad, M. U. (2022). Optimasi peningkatan kualitas air sumur gali melalui penggunaan tawas (aluminium potassium sulfate) terhadap Escherichia coli. Jurnal SAGO Gizi dan Kesehatan, 3(1), 22.

Septianto, F., Masrida, R., & Nuraliyah, A. (2024). Analisis pembuatan dan penggunaan koagulan poly aluminium chloride (PAC) pada proses penjernihan air. Dynamics in Engineering Systems: Innovations and Applications, 1(1), 58–71.

Sholeh, M., Putra, Y. S., & Adriat, R. (2022). Kajian parameter fisis kualitas air berdasarkan nilai total suspended solid (TSS) di Sungai Belidak Kecamatan Sungai Kakap. Prisma Fisika, 10(3), 296–303.

Sudarningsih, Lestiana, E., & Wianto, T. (2013). Analisa polusi logam berat sepanjang daerah aliran sungai (DAS) Tabalong Kalimantan Selatan. Jurnal Fisika FLUX, 10(1).

Tsoutsa, E. K., Tolkou, A. K., & Kyzas, G. Z. (2024). New trends in composite coagulants for water and wastewater treatment. AppliedChem, 4(3), 921–948. https://doi.org/10.3390/appliedchem4030030

Wang, C., Alpatova, A., McPhedran, K. N., & El-Din, M. G. (2015). Coagulation/flocculation process with polyaluminum chloride for the remediation of oil sands process-affected water: Performance and mechanism study. Journal of Environmental Management, 160, 254–262. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.025

World Health Organization. (2004). Water treatment and pathogen control: Process efficiency in achieving safe drinking-water. World Health Organization.

World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda. World Health Organization.

Yunia, Y. P., Suharti, P. H., & Prayitno, P. (2025). Studi pengaruh koagulasi-flokulasi dalam pengolahan limbah cair laboratorium Jurusan Teknik Kimia dalam penurunan kekeruhan dan TSS. Distilat: Jurnal Teknologi Separasi, 11(2), 370–379.