

Evaluasi Kinerja Filtrasi Mekanis untuk Pengolahan *Sludge Run-Off* Tambang Batubara

R. Syafira¹, J.S.M. Ahmad^{1*}, S.P. Saraswati¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: johan.syafri.ma@ugm.ac.id

INTISARI

Limbah *sludge run-off* yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan batubara mengandung padatan tersuspensi (TSS), logam berat, dan senyawa kompleks yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan tepat. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik fisikokimia *sludge run-off* serta efektivitas proses filtrasi mekanis dalam menurunkan parameter pencemar, dengan acuan baku mutu air berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023. Sampel limbah diperoleh dari PT. X dan diuji di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Parameter yang dianalisis meliputi pH, TDS, EC, ORP, TSS, zeta potensial, mikro partikel, serta kualitas air pasca-filtrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filtrasi mampu menurunkan kadar TSS secara signifikan, namun kurang efektif dalam mereduksi kandungan ion terlarut dan logam berat. Nilai zeta potensial yang tinggi menunjukkan kestabilan koloid yang menghambat proses filtrasi. Evaluasi kualitas air bersih dari enam titik lokasi menunjukkan bahwa beberapa parameter fisika, kimia, dan mikrobiologi tidak memenuhi standar, terutama pada TDS, kekeruhan, warna, Fe, Mn, serta kontaminasi mikrobiologis (*E. coli* dan *Total Coliform*). Oleh karena itu, diperlukan pengolahan lanjutan dengan pendekatan integratif agar hasil olahan air limbah tambang memenuhi standar lingkungan dan kesehatan.

Kata kunci: filtrasi, kualitas air, logam berat, *sludge run-off*, TSS.

1 PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan, khususnya tambang batubara, menghasilkan limbah cair berupa *sludge run-off* yang berasal dari proses pengerukan lumpur di *settling pond*. Limpasan ini berpotensi mengandung padatan tersuspensi (*Total Suspended Solids/TSS*), logam berat, serta senyawa organik kompleks, yang bila tidak ditangani dengan baik dapat mencemari badan air dan mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik. Selain itu, karakteristik limbah yang sangat koloidal dan berwarna pekat dengan bau menyengat menandakan adanya senyawa organik dan anorganik yang sulit terurai dan sulit disaring secara konvensional.

Permasalahan utama dalam pengelolaan *sludge run-off* ini adalah tingkat indeks filterabilitas yang sangat rendah, yang disebabkan oleh dominasi partikel koloid bermuatan negatif dengan zeta potensial tinggi. Stabilitas elektrostatis partikel ini menyebabkan kesulitan dalam proses flokulasi dan filtrasi, sehingga mempercepat pembentukan *cake layer* pada media filter dan menurunkan efisiensi aliran. Hal ini memperparah potensi pencemaran karena proses pengolahan air tidak berjalan optimal.

Menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023, kualitas air yang aman dikonsumsi harus memenuhi standar tertentu untuk parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi, termasuk batas maksimum TSS, logam berat (seperti besi, mangan), serta warna dan bau. Oleh karena itu, pengukuran kualitas air limbah perlu dievaluasi secara sistematis dengan mengacu pada regulasi tersebut agar dapat diketahui apakah air hasil pengolahan limbah tambang telah memenuhi kriteria standar lingkungan dan kesehatan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa limpasan tambang mengandung TSS dalam konsentrasi tinggi, yang dapat menghambat penetrasi cahaya dalam air, mengganggu fotosintesis organisme akuatik, serta meningkatkan kekeruhan (Ngole-Jeme and Ndava, 2023). Sementara itu, logam berat seperti besi, mangan, kromium bersifat toksik terhadap biota air dan dapat menyebabkan bioakumulasi dalam rantai makanan (Yoon and Yoon, 2022).

Strategi pengelolaan *sludge run-off* yang tepat sangat bergantung pada pemahaman sifat fisiko-kimia limbah, termasuk nilai TSS, mikro partikel, dan zeta potensial. Menurut Masindi et al. (2022), karakteristik koloidal limbah dapat menentukan efektivitas teknologi pengolahan. Kementerian LHK (2022) menekankan pentingnya penyesuaian standar pengelolaan limbah tambang dengan karakteristik spesifik dari air limbah tersebut. Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan karakteristik fisiko-kimia air limbah hasil *sludge run-off* tambang

batubara, dengan merujuk pada standar baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023. Evaluasi ini penting untuk menentukan efektivitas pengolahan air dan kesesuaian hasil pengolahan dengan ketentuan regulasi yang berlaku.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Waktu pelaksanaan penelitian berlangsung selama September 2024 hingga Januari 2025, mencakup seluruh tahapan mulai dari analisis dan interpretasi data hasil eksperimen.

2.2 Prosedur Penelitian

Sampel *sludge run-off* tambang batubara yang diperoleh dari PT. X terlebih dahulu dikarakterisasi untuk mengetahui sifat fisik dan kimia awal sebelum dan sesudah proses filtrasi. Parameter yang dianalisis meliputi *potential hydrogen* (pH), *total dissolved solids* (TDS), *electrical conductivity* (EC), *oxidation-reduction potential* (ORP), *total suspended solids* (TSS), indeks filterabilitas, zeta potensial, dan distribusi mikro partikel. Karakterisasi pasca-filtrasi dilakukan untuk menilai efektivitas pengolahan dalam menurunkan parameter pencemar serta kesesuaiannya dengan baku mutu air berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023. Pengujian kualitas air bersih dan hasil filtrasi mengacu pada standar tersebut, mencakup parameter fisika seperti suhu, warna, bau, kekeruhan, dan TDS; parameter kimia seperti pH, kadar besi (Fe), mangan (Mn), nitrat (NO_3^-), dan nitrit (NO_2^-), serta parameter mikrobiologi seperti *Total Coliform* dan *Escherichia coli*.

Eksperimen laboratorium dirancang untuk mengevaluasi efektivitas proses filtrasi secara langsung terhadap *sludge run-off* tanpa tahapan *pretreatment*, dengan menggunakan media penyaring. Tujuan utama dari eksperimen ini adalah mengkaji kemampuan media dalam menurunkan kandungan pencemar partikulat, serta menilai kinerja filter berdasarkan laju aliran, waktu terjadinya penyumbatan, dan kapasitas filtrasi. Seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi laboratorium yang terkendali dan dilaksanakan secara berulang (replikasi) guna menjamin konsistensi dan validitas data. Efektivitas setiap tahapan perlakuan dievaluasi berdasarkan perubahan nilai parameter pencemar utama sebelum dan sesudah proses filtrasi.

2.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: stopwatch, Lutron WA2017SD, ORP Meter VA-3011SD, pompa vakum, corong filtrasi, clamp, media penyaring (porus), kertas filter, erlenmeyer, pH Meter VA-301, gelas ukur, corong, pipet ukur, serta sampel *sludge run-off* tambang batubara yang diperoleh dari PT. X.

3 PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Limbah *Sludge Run-Off* Tambang Batubara

Hasil studi ini menunjukkan bahwa limbah *sludge* dari run-off tambang batubara memiliki karakteristik kualitas air yang sangat dipengaruhi oleh lokasi sumber air. Parameter-parameter yang diuji termasuk pH, EC, TDS, ORP, zeta potensial, TSS, mikro partikel, dan indeks filterabilitas mengindikasikan adanya beban pencemar yang cukup tinggi terutama dari titik-titik terkait dengan proses pengolahan lumpur seperti pada sampel D, E, F dan G. Secara umum, filtrasi mekanis mampu menurunkan kandungan padatan tersuspensi dan meningkatkan kejernihan air, namun tidak efektif dalam menghilangkan zat terlarut seperti ion logam atau senyawa anorganik. Tabel 1. menyajikan hasil uji *sludge run-off* tambang batubara sebelum filtrasi, dan Tabel 2. menyajikan hasil uji *sludge run-off* tambang batubara sesudah filtrasi yang selanjutnya dianalisis per parameter sebagai berikut:

a. pH

Sebelum filtrasi, sebagian besar sampel menunjukkan nilai pH asam (5,02–6,74), yang merupakan indikasi kuat terjadinya proses *acid mine drainage* (AMD) (Balintova et al, 2013). Proses ini terjadi akibat oksidasi mineral sulfida, khususnya pirit (FeS_2), yang menghasilkan ion H^+ dan sulfat (Tripathy, 2014). Kondisi ini sangat relevan pada sampel A, B, D dan E yang menunjukkan pH terendah. Pasca-filtrasi, terjadi peningkatan signifikan pada nilai pH ($p = 0,0139$), terutama pada sampel G (pH = 7,90). Ini menunjukkan bahwa media filtrasi kemungkinan memiliki kemampuan netralisasi melalui reaksi antara asam dan mineral basa seperti kalsit atau dolomit. Hal ini

mengimplikasikan bahwa sistem filtrasi dapat didesain tidak hanya sebagai pemisah fisik, tetapi juga sebagai agen kimia aktif.

Tabel 1. Hasil Uji *Sludge Run-Off* Tambang Batubara Sebelum Filtrasi

Sampel	Keterangan	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	TDS (mg/L)	ORP (mV)	Zeta Potensial (mV)	Mikro Partikel (μm)	TSS (mg/L)	Indeks Filterabilitas
Pump air bersih	A	5,60	113,37	53,87	280,33	-	-	93,61	5,38
Pump air bersih bocor	B	5,09	112,90	53,63	340,33	-	-	1760,00	29,33
Sampel air outlet 3F	C	6,74	228,33	109,47	235,00	-	-	193,33	8,67
Slurry pump A	D	5,02	173,63	82,93	336,67	-37,43	6,82	86540,00	168,48
Slurry pump B	E	5,25	162,37	77,53	339,00	-33,50	4,30	88233,33	149,43
Dragflow D2	F	6,31	367,33	176,90	301,33	-35,07	5,60	123086,67	112,48
Dragflow RTM	G	6,44	612,00	297,33	85,00	-36,50	6,17	533100,00	139,76

Tabel 1. Hasil Uji *Sludge Run-Off* Tambang Batubara Sesudah Filtrasi

Sampel	Keterangan	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
Pump air bersih	A	5,73	115,63	54,97	280,67
Pump air bersih bocor	B	5,09	112,90	53,63	234,33
Sampel air outlet 3F	C	7,14	239,67	114,80	234,33
Slurry pump A	D	6,45	181,33	86,63	340,33
Slurry pump B	E	6,82	184,57	88,23	232,67
Dragflow D2	F	7,66	380,33	183,40	202,33
Dragflow RTM	G	7,90	615,67	300,00	160,33

b. Total Dissolved Solids (TDS) dan Electrical Conductivity (EC)

Nilai EC dan TDS sebelum dan sesudah filtrasi menunjukkan bahwa filtrasi mekanis tidak mampu menurunkan kandungan ion terlarut secara signifikan. Sampel G menunjukkan nilai EC dan TDS tertinggi, masing-masing 612 $\mu\text{S/cm}$ dan 297 mg/L. Korelasi yang sangat kuat antara EC dan TDS ($r = 0,9999$) menunjukkan dominasi zat anorganik dalam sistem air run-off tambang. Secara statistik, terdapat perbedaan signifikan antar lokasi (Friedman, $p = 0,0062$), namun peningkatan EC pasca-filtrasi juga signifikan ($p = 0,0249$) meskipun kecil. Tingginya EC dan TDS pada sampel G mengindikasikan pelindian mineral dan pelepasan ion dari batuan akibat aktivitas pertambangan, terutama batu bara. Proses ini mempercepat pelapukan dan meningkatkan kadar kalsium, magnesium, sulfat, dan bikarbonat. Interaksi air dan oksigen dengan residu tambang turut berkontribusi terhadap peningkatan TDS (Clark et al, 2017). Kandungan ion yang tinggi berpotensi mengganggu osmoregulasi organisme akuatik dan menurunkan kualitas ekosistem (Jia et al, 2017). Hal ini perlunya unit pengolahan tambahan untuk mencapai kualitas air yang layak guna ulang.

c. Oxidation Reduction Potential (ORP)

Nilai ORP yang tinggi pada beberapa sampel (>300 mV) menunjukkan kondisi oksidatif yang dapat meningkatkan pelarutan logam berat seperti Fe dan Mn (Qiao et al., 2018). Sebaliknya, sampel G menunjukkan kondisi reduktif (85 mV), yang dapat menyebabkan presipitasi logam atau pembentukan kompleks dengan bahan organik. Proses ini menurunkan kelarutan logam dalam air, sesuai dengan pengamatan bahwa kondisi reduksi cenderung mengendapkan logam (Jahanirad et al, 2023). Meskipun filtrasi sedikit menurunkan nilai ORP secara rata-rata, secara statistik perubahan tersebut tidak signifikan ($p = 0,262$). Ini memperkuat pandangan bahwa ORP dipengaruhi oleh kondisi kimia spesifik, bukan sekadar kehadiran partikel tersuspensi.

d. Stabilitas Koloid: Zeta Potensial dan Mikro partikel

Nilai zeta potensial yang tinggi dalam kisaran negatif ($-33,50$ hingga $-37,43$ mV) pada sampel D, E, F dan G mengindikasikan stabilitas koloid yang sangat tinggi (Zhang, 2024). Stabilitas ini menyebabkan partikel tersuspensi sulit mengendap secara alami, bahkan setelah waktu tinggal yang panjang. Keberadaan mikro partikel yang tinggi (4,30–6,82 unit), terutama pada sampel D dan G, memperkuat temuan ini. Korelasi Pearson negatif sangat kuat antara zeta potensial dan mikro partikel ($r = -0,99$) menunjukkan bahwa semakin stabil sistem, semakin besar kemungkinan partikel tetap dalam fase tersuspensi. Stabilitas koloid yang tinggi menghambat agregasi partikel menjadi mikro partikel, sementara penurunan stabilitas mendorong pembentukan mikro partikel lebih banyak. Hal ini menegaskan pentingnya pengendalian stabilitas koloid dalam pengolahan air.

Stabilitas suspensi koloid ini dipengaruhi oleh muatan permukaan partikel dan kekuatan ion dalam larutan. Kekuatan ion yang tinggi dapat menekan lapisan ganda listrik pada permukaan partikel, sehingga mengurangi gaya tolak elektrostatis dan mendorong terjadinya agregasi partikel (Harbottle et al., 2006). Selain itu, perubahan pH dan keberadaan ion tertentu juga dapat memodifikasi muatan permukaan partikel, yang berpotensi menurunkan muatan tersebut dan meningkatkan agregasi (Missana et al., 2014). Teori DLVO menjelaskan bahwa stabilitas koloid ditentukan oleh keseimbangan antara gaya tarik van der Waals dan gaya tolak elektrostatis. Namun, gaya non-DLVO seperti efek sterik dan hidrasi juga memiliki peran penting dalam menjaga atau mengurangi stabilitas koloid (Bal, 2019). Secara keseluruhan, keseimbangan antara gaya-gaya ini menentukan apakah koloid akan tetap stabil atau mengalami agregasi, di mana stabilisasi sterik berkontribusi pada peningkatan stabilitas, sementara gaya deplesi mendorong agregasi (Bellmann et al., 2008).

e. *Total Suspended Solids* (TSS) dan Indeks Filterabilitas

Nilai TSS yang sangat tinggi pada sampel D, E, F dan G (hingga 533.100 mg/L pada sampel G) menandakan bahwa proses tambang menghasilkan beban padatan yang ekstrem. Kondisi ini sejalan dengan nilai indeks filterabilitas yang tinggi (>100) pada titik-titik tersebut, yang mengindikasikan bahwa air sangat sulit disaring secara alami. Indeks filterabilitas dihitung sebagai rasio antara waktu penyaringan sampel dengan waktu penyaringan aquades, yang menunjukkan efisiensi proses filtrasi tanpa satuan. Kesulitan filtrasi ini terutama disebabkan oleh keberadaan partikel dengan ukuran mikro dan nano yang stabil secara koloid, sehingga diperlukan pendekatan pengolahan yang mengintegrasikan proses koagulasi-flokulasi sebelum tahap filtrasi untuk mengatasi tantangan ini.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa filtrasi mekanis tanpa tahapan pendahuluan hanya efektif dalam menurunkan padatan tersuspensi (TSS), namun tidak memberikan dampak signifikan terhadap parameter kimia seperti TDS dan kandungan logam berat. Hal ini menegaskan bahwa limbah *sludge run-off* memiliki karakteristik koloidal yang memerlukan proses destabilisasi sebelum tahap penyaringan. Beberapa studi terdahulu telah menunjukkan bahwa integrasi *pretreatment* seperti koagulasi-flokulasi dapat meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat dan zat terlarut (Masindi et al, 2022). Oleh karena itu, pendekatan filtrasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut melalui kombinasi metode fisika dan kimia untuk mencapai hasil pengolahan air limbah yang sesuai dengan standar baku mutu. Integrasi ini menjadi peluang pengembangan teknologi sederhana namun lebih efektif untuk pengolahan limbah tambang di masa mendatang.

3.2 Hasil Kualitas Air Bersih berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023

Pengambilan sampel dilakukan di lokasi berbeda yang merepresentasikan area sekitar aktivitas pertambangan. Setiap lokasi diuji menggunakan parameter fisik, kimia, dan biologi untuk mengevaluasi variasi kualitas air bersih di lapangan. Tabel 3. menyajikan hasil pengujian kualitas air bersih berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, yang selanjutnya dianalisis per parameter. Pengujian mikrobiologi *Total Coliform* dalam jumlah TNTC (*Too Numerous To Count*), menandakan kontaminasi mikrobiologis yang tinggi dan tidak memenuhi baku mutu air bersih Permenkes No. 2 Tahun 2023. *E. coli* terdeteksi pada empat dari enam titik sampel, dengan konsentrasi mencapai 2–30 CFU/100 mL, melebihi batas baku mutu (0 CFU/100 mL). Temuan ini menunjukkan kontaminasi fekal yang konsisten di berbagai titik. Kondisi ini menjadi indikator risiko penyakit berbasis air seperti diare, kolera, dan hepatitis A, khususnya bagi kelompok rentan seperti anak-anak, lansia, dan individu dengan gangguan imun (EPA, 2018). Nilai suhu air berada di antara 22,3 °C hingga 22,8 °C, yang masih dalam batas aman menurut Permenkes (maksimal 3 °C di bawah suhu ambient). Keseluruhan titik memenuhi persyaratan termal. Konsentrasi TDS bervariasi antara 60–322 mg/L. Lima dari enam lokasi berada di bawah ambang batas ≤ 300 mg/L. Namun, satu lokasi (titik G) memiliki kadar TDS sebesar 322 mg/L, yang melampaui batas baku mutu, yang mencerminkan keberadaan mineral atau kontaminan terlarut dalam jumlah cukup tinggi, yang dapat memengaruhi rasa air, meningkatkan potensi korosi pada sistem perpipaan, serta menurunkan efisiensi proses pengolahan (Burlingame et al., 2007).

Tabel 3 Pengujian Kualitas Air Bersih berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023

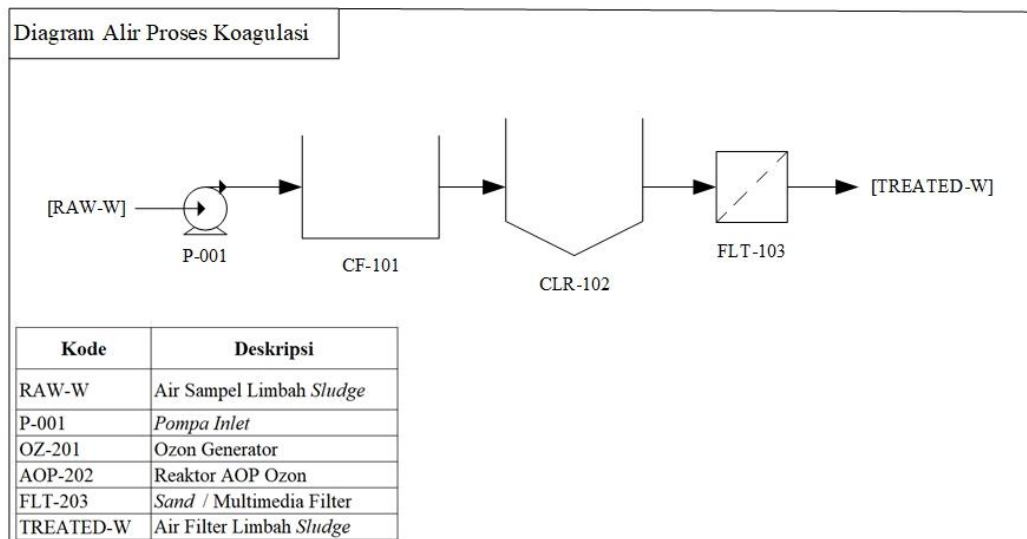
Sampel	Ket	Total Coliform (CFU/100ml)	E. coli (CFU/100 ml)	Suhu (°C)	TDS (mg/L)	Kekeruhan (NTU)	Warna (TCU)	Bau	pH	NO3 (mg/L)	NO2 (mg/L)	Cr6+ (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
Pump air bersih	A	TNTC	0	22,3	60	3,4	7	Tidak berbau	7,5	1,46	<0,0314	<0,0066	0,0195	0,4598
Sampel air outlet 3F	C	TNTC	30	22,6	125	32,2	60	Tidak berbau	7,7	1,91	<0,0314	<0,0066	0,0958	0,0098
Slurry pump A	D	TNTC	20	22,8	94	1,2	1	Tidak berbau	7,8	0,35	<0,0314	<0,0066	0,0168	1,3689
Slurry pump B	E	TNTC	25	22,7	95	1,2	3	Tidak berbau	7,7	0,7	<0,0314	<0,0066	0,0168	1,4963
Dragflow D2	F	TNTC	2	22,6	200	1,3	6	berbau amis	8	0,3	<0,0314	<0,0066	0,7411	1,3839
Dragflow RTM	G	TNTC	0	22,3	322	0,6	2	Tidak berbau	8,2	0,71	<0,0314	<0,0066	0,0168	0,0324
Standar Baku Mutu		0	0	Suhu udara	<300	<3	10	\	6,5 - 8,5	20	3	0,01	0,2	0,1
Metode Uji		APHA 2017 section 9222-J	APHA 2017 section 9222-J	SNI 06-6989.23-2005	IK/BB TKLPP /3-K/Pj-C-39	SNI 06-6989.25-2005	SNI 6989.80.2011	In House Methode	SNI 06-6989.11-2019	APHA 2017, Section 4500-NO3B	SNI 06-6989.9-2004	APHA 2017, Section 3500 B Cr B	SNI 6989.84-2019	SNI 6989.84-2019

Nilai warna tertinggi ditemukan di lokasi C (60 TCU), melebihi batas maksimal 10 TCU, Warna air yang tidak normal juga mengindikasikan keberadaan kontaminan kimia yang berpotensi membahayakan jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Sampel C menunjukkan kekeruhan sebesar 32,2 NTU, jauh di atas ambang batas ≤ 3 NTU. Lima lokasi lainnya berada di kisaran aman (0,2–3,4 NTU). Tingkat kekeruhan yang tinggi tidak hanya mengganggu kejernihan visual, tetapi juga dapat menghambat efektivitas proses disinfeksi serta meningkatkan risiko keberadaan mikroorganisme patogen di dalam air (Balintova et al., 2014). Sampel titik F tercium bau amis, meskipun bau tidak diatur secara kuantitatif dalam Permenkes. Hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya senyawa sulfur atau logam berat yang menurunkan mutu estetika air. Adanya bau amis pada salah satu titik mengindikasikan keberadaan senyawa volatil seperti hidrogen sulfida (H_2S), yang dapat bersifat toksik.

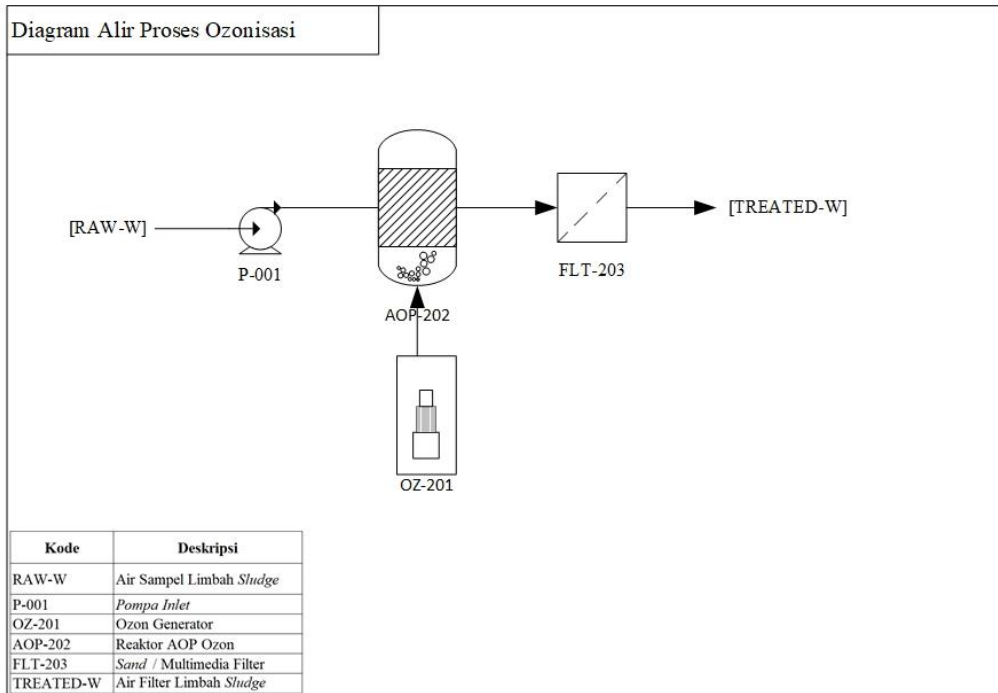
Parameter kimia pada nilai pH berkisar antara 7,5–8,2, yang seluruhnya masih berada dalam kisaran baku mutu 6,5–8,5. Ini menunjukkan kondisi kimia air yang stabil dan aman untuk konsumsi. Konsentrasi NO_3^- sangat rendah (0,3–1,91 mg/L), jauh di bawah batas maksimum 20 mg/L, menandakan tidak adanya kontaminasi nitrogen anorganik. Semua sampel menunjukkan hasil $NO_2^- < 0,0314$ mg/L, jauh di bawah ambang batas 3 mg/L. Ini mencerminkan stabilitas sistem perairan dan tidak adanya penumpukan nitrit berbahaya. Konsentrasi Cr^{6+} berada di bawah $< 0,0066$ mg/L, jauh di bawah batas maksimal 0,01 mg/L — menunjukkan tidak adanya pencemaran berbahaya dari logam berat ini. Nilai Fe berkisar antara 0,0168–0,7411 mg/L. Lima lokasi memenuhi baku mutu $\leq 0,2$ mg/L, sedangkan satu lokasi (titik F) melampaui ambang batas hingga mencapai 0,7411 mg/L, menunjukkan risiko kontaminasi logam berat yang memerlukan penanganan lanjut. Empat titik lokasi (A, D, E, dan F) menunjukkan kadar mangan sangat tinggi (0,4598–1,4963 mg/L), melebihi batas baku mutu $\leq 0,1$ mg/L hingga lebih dari 13 kali lipat, menandakan akumulasi signifikan yang berisiko terhadap kesehatan. Kadar besi dan mangan yang melebihi ambang batas dapat menurunkan kualitas estetika air, menimbulkan endapan, serta menyebabkan bau, rasa tak sedap, dan perubahan warna (Khatri et al., 2017). Zat besi berlebih juga dapat memicu pertumbuhan bakteri dan biofouling pada sistem distribusi air (Leonov et al., 2022). Secara kesehatan, paparan kronis terhadap besi dikaitkan dengan hemochromatosis, penyakit kardiovaskular, dan gangguan kulit (Egorova and Kanatnikova, 2017). Sementara itu, mangan dalam konsentrasi tinggi berisiko menyebabkan gangguan neurologis seperti manganisme, terutama pada anak-anak (Lu et al., 2021).

3.3 Pengembangan Teknologi dan Implikasi Praktis

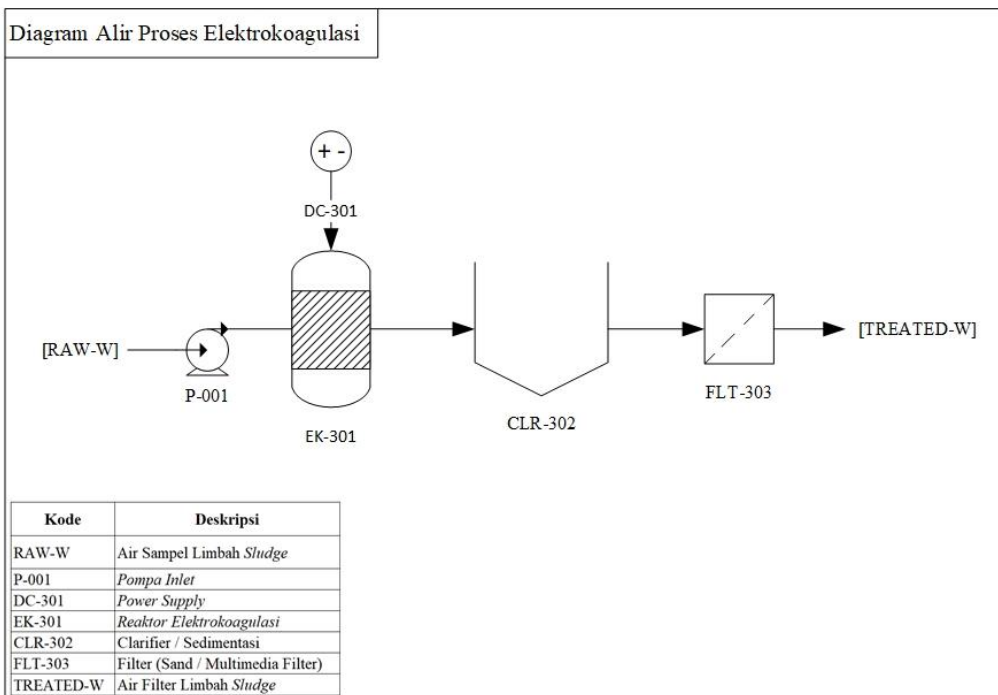
Berdasarkan hasil penelitian, filtrasi mekanis memiliki keterbatasan dalam menurunkan parameter ionik dan logam berat seperti Fe dan Mn. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengolahan yang lebih integratif dengan menggabungkan tahapan *pretreatment* seperti koagulasi-flokulasi, *advanced oxidation processes* (AOP), dan elektrokoagulasi sebelum tahap filtrasi. Penggunaan *pretreatment* akan menurunkan kestabilan koloid (zeta potensial) dan meningkatkan efisiensi penyisihan mikro partikel dan zat terlarut. Untuk memperjelas tahapan pengolahan tersebut, disajikan tiga diagram alir proses yang menggambarkan opsi unit *pretreatment* sebelum filtrasi akhir, yaitu: Gambar 1 Diagram Alir Proses Koagulasi-Flokulasi; Gambar 2 Diagram Alir Proses Ozon (AOP); dan Gambar 3 Diagram Alir Proses Elektrokoagulasi.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Koagulasi



Gambar 2. Diagram Alir Proses Ozon (AOP)



Gambar 3. Diagram Alir Proses Elektrokoagulasi

Selain itu, penerapan sistem pengolahan modular berskala kecil dapat dikembangkan untuk diterapkan di area tambang terpencil, dengan desain yang mudah dioperasikan oleh masyarakat atau operator lokal. Dengan demikian, hasil pengolahan tidak hanya memenuhi aspek teknis tetapi juga ekonomis dan sosial. Secara praktis, sistem filtrasi sederhana dapat digunakan sebagai tahap awal pengolahan air untuk kebutuhan non-konsumsi (seperti air cuci atau irigasi terbatas), namun tidak disarankan langsung digunakan sebagai air konsumsi tanpa tahapan pengolahan lanjutan. Studi lanjutan disarankan untuk mengkaji efisiensi kombinasi metode pengolahan serta evaluasi kelayakan ekonomi dan dampaknya terhadap kualitas lingkungan secara menyeluruh.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah cair *sludge run-off* dari kegiatan pertambangan batubara memiliki karakteristik fisikokimia yang kompleks dan berpotensi mencemari lingkungan, dengan konsentrasi TSS sangat

tinggi, kestabilan koloid yang kuat (zeta potensial negatif tinggi), serta kandungan logam berat seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) yang melebihi ambang batas baku mutu. Filtrasi mekanis tanpa perlakuan pendahuluan terbukti mampu menurunkan kadar TSS dan meningkatkan kejernihan air, namun tidak efektif dalam mengurangi kandungan ion terlarut dan parameter kimia lainnya. Analisis terhadap sampel air bersih di sekitar lokasi tambang mengindikasikan bahwa sebagian besar parameter fisik, kimia, dan mikrobiologi tidak memenuhi standar kualitas air bersih berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023, terutama pada parameter TDS, kekeruhan, warna, kandungan Fe dan Mn, serta kontaminasi mikrobiologis (*Total Coliform* dan *Escherichia coli*). Temuan ini menegaskan bahwa pengolahan *sludge run-off* memerlukan pendekatan integratif yang melibatkan kombinasi antara proses fisik, kimia, dan biologis untuk mencapai efektivitas yang optimal dalam mengendalikan pencemaran serta memastikan kesesuaian hasil olahan dengan ketentuan lingkungan dan kesehatan masyarakat.

REFERENSI

- Bal, V. (2019). "Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces." *Langmuir*, 35(40), 13041–13049.
- Balintova, M., Holub, M., Stevulova, N., Cigasova, J., and Tesarcikova, M. (2014). "Sorption in acidic environment – Biosorbents in comparison with commercial adsorbents." *Chemical Engineering Transactions*, 39, 625–630.
- Balintova, M., Pavlikova, P., Holub, M., and Petrilkova, A. (2013). "Leaching of heavy metals from contaminated sediment." *Chemical Engineering Transactions*, 35, 865–870.
- Bellmann, C., Petzold, G., Mende, M., and Hempel, S. (2008). "Evaluation of nanoparticle containing dispersions." *VDI Berichte*.
- Burlingame, G. A., Dietrich, A. M., and Whelton, A. J. (2007). "Understanding the basics of tap water taste." *J. Amer. Water Works Assoc.*, 99(5), 100–111.
- Clark, E. V., Zipper, C. E., Daniels, W. L., Orndorff, Z. W., and Keefe, M. J. (2017). "Modeling patterns of total dissolved solids release from central Appalachia, USA, mine spoils." *J. Environ. Qual.*, 46(2), 375–383.
- Harbottle, D., Webber, G., Fairweather, M., Rhodes, D., and Biggs, S. (2006). "Applying the quartz crystal microbalance technique to determine the stability of colloidal suspensions." *Proc., AIChE Annual Meeting*, American Institute of Chemical Engineers.
- Jahanirad, M., Nasrabadi, T., and Karbassi, A. (2023). "Role of salinity and oxidation-reduction potential in mobility of heavy metals in suspended sediments at estuarine zone." *Pollution*, 9(1), 183–193.
- Jia, X., Zhao, Q., Guo, F., Ma, S., Zhang, Y., and Liu, J. (2017). "Evaluation of potential factors affecting deriving conductivity benchmark by utilizing weighting methods in Hun-Tai River Basin, Northeastern China." *Environ. Monit. Assess.*, 189, Article 355.
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Perubahan atas Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum*.
- Khatri, N., Tyagi, S., and Rawtani, D. (2017). "Recent strategies for the removal of iron from water: A review." *J. Water Process Eng.*, 20, 291–304.
- Leonov, V., Leonova, L., Cherepanov, D., Savin, L., and Tkalich, A. (2022). "The growth kinetics of pathogenic microorganisms under conditions modelling the vital functions of iron-oxidizing bacteria." *BioNanoScience*, 12(1), 299–307.
- Lu, L.-L., Liang, Y., Fang, Y.-Y., Deng, Y., and Jiang, Y.-M. (2021). "Research progress in central nervous system toxicity caused by excessive manganese or iron exposure alone or in combination." *Chin. J. Pharmacol. Toxicol.*, 35(9), 641–647.
- Masindi, V., Foteinis, S., Renforth, P., Ndiritu, J., Maree, J. P., and others. (2022). "Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review." *Ecol. Eng.*, 181, 106740.
- Missana, T., Benedicto, A., Mayordomo, N., and Alonso, U. (2014). "Analysis of anion adsorption effects on alumina nanoparticles stability." *Appl. Geochem.*, 47, 141–150.
- Ngole-Jeme, V. M., and Ndava, J. (2023). "The implications of AMD induced acidity, high metal concentrations and ochre precipitation on aquatic organisms." *Pol. J. Environ. Stud.*, 32(5).
- Qiao, Y., Zhu, Z., Yang, L., and Liu, Z. (2018). "Monitoring and simulated experiments of oxidation-reduction potential of boiler feedwater at high temperatures." *J. Chin. Soc. Corros. Prot.*, 38(1).
- Tripathy, D. P. (2014). "Prevention and treatment of acid mine drainage: An overview." In Singh, G., Singh, A. R., and Singh, R. N. (Eds.), *Recent Trends in Modelling of Environmental Contaminants*, Springer, 33–52.

Yoon, H., and Yoon, J. (2022). "The impact evaluation of acid mine drainage on zebrafish (*Danio rerio*) and water fleas (*Daphnia magna*) in the vicinity of the Geum River Basin in Korea." *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(24), 16470.

Zhang, Z. (2024). "A new method for estimating zeta potential of carboxylic acids' functionalised particles." *Mol. Phys.*, 122(3).