

Perbandingan Jenis Koagulan *Ferric Sulfate* dan *Ferric Chloride* Dalam Penurunan *Total Suspended Solid* Air Limbah *Silica-Coal*

M. Makmur¹, E. Ariani³, S.P. Saraswati^{1,2}, J.S.M. Ahmad^{1,2,*}

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

²Pusat Studi Lingkungan Hidup, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

³PT. Indocement Tungal Prakarsa Tbk Unit Tarjun, Kalimantan Selatan, INDONESIA

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

INTISARI

Tambang adalah area yang digunakan untuk melakukan ekstraksi atau pengambilan bahan tambang, seperti mineral, batu bara, minyak bumi, gas alam, dan sejenisnya. Limpasan permukaan (*runoff*) merupakan istilah yang digunakan untuk mendefinisikan air yang mengalir dari permukaan tanah dan mengalir ke sungai, danau, atau laut. Tingginya *runoff* atau aliran permukaan air di sekitar lokasi tambang dapat meningkatkan *Total Suspended Solids* (TSS) pada air limbah pertambangan *silica-coal*. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan jenis zat kimia serta perlakuan yang sesuai untuk mengurangi kandungan TSS dalam limbah cair tambang *silica-coal*. Pendekatan penelitian dimulai dengan karakterisasi air limbah melalui pengujian TSS, pH, Konduktivitas Listrik, dan kandungan logam di dalamnya. Selain itu, partikel padatan dalam air limbah juga dikarakterisasi dengan mengukur ukuran partikel dan potensial zeta. Hasil dari *jar test* menggunakan *ferric sulfate* dan *ferric chloride* menunjukkan bahwa kedua jenis koagulan tersebut mampu memberikan pengurangan TSS yang signifikan pada dosis yang sesuai. Dosis 250 mg/L dari *ferric sulfate* menghasilkan pengurangan TSS sebesar 95,30%, sementara dosis 70 mg/L dari *ferric chloride* mencapai pengurangan TSS sebesar 96,47%. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan kedua koagulan mampu efektif mengurangi kadar TSS dalam air limbah.

Kata kunci: *Total Suspended Solid*, Koagulasi-Flokulasi, *Jar Test*

1 PENDAHULUAN

Tambang adalah area yang digunakan untuk melakukan ekstraksi atau pengambilan bahan tambang, seperti mineral, batu bara, minyak bumi, gas alam, dan sejenisnya. Kegiatan penambangan dapat memberikan manfaat ekonomi yang besar, namun juga dapat menimbulkan dampak lingkungan dan sosial yang signifikan jika tidak dilakukan dengan hati-hati dan bertanggung jawab. Kegiatan penambangan dapat menghasilkan pengikisan dan pengelupasan pada tanah, apabila hal ini terjadi disertai dengan terjadinya hujan di area pertambangan, hal ini dapat menyebabkan terbentuknya *runoff* yang akan menjadi air limbah dimana air tersebut mengalir di atas permukaan tanah dan mengikuti kemiringan atau topografi tanah menuju sungai atau danau terdekat (Wirasembada, Setiawan and Saptomo, 2017) dan menjadi kewajiban untuk setiap industri pertambangan di Indonesia untuk mengolahnya. Limbah cair dari tambang silika dapat memiliki pH yang rendah (asam) atau tinggi (basa), tergantung pada proses tambang yang terlibat. Limbah cair yang berasal dari *stockpile* dapat mengandung batu bara halus dan sejumlah zat terlarut (Fitriyanti, 2014).

Limpasan permukaan, yang juga dikenal sebagai *runoff*, mencakup sebagian dari volume air hujan yang mengalir di atas permukaan tanah dan menuju ke arah sungai, danau, atau bahkan laut. Terjadinya *runoff* terkait dengan kondisi di mana tanah tidak mampu lagi menyerap air yang jatuh ke permukaannya karena telah mencapai tingkat kejenuhan. Selain itu, fenomena *runoff* dapat terjadi ketika hujan turun di atas permukaan yang tidak dapat menyerap air dengan baik, seperti pada area yang tertutup oleh material *impermeable* seperti beton, aspal, keramik, dan material lainnya yang tidak memungkinkan air meresap ke dalam tanah. Akibat dari kondisi ini, peristiwa banjir dan erosi yang sering terjadi di beberapa wilayah di Indonesia menjadi dampak yang signifikan dari masalah *runoff* yang tidak mampu ditangani dengan optimal (Wirasembada, Setiawan and Saptomo, 2017). Tingginya *runoff* atau aliran permukaan air di sekitar lokasi tambang dapat meningkatkan TSS pada air limbah pertambangan. Hal ini disebabkan karena aliran permukaan air akan membawa material atau partikel-partikel halus yang ada di permukaan tanah dan berakhir di dalam kolam atau area penampungan limbah pertambangan.

Air limbah hasil *runoff* tambang *silica-coal* memiliki beberapa karakteristik yang khas dan berpotensi merusak lingkungan serta kesehatan manusia. Pertama-tama, air limbah ini sering kali mengandung tingkat keasaman yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh reaksi antara air dan mineral-mineral seperti pirit yang ada di batuan, menghasilkan asam sulfat. Keasaman yang tinggi dalam air limbah dapat merusak ekosistem air tawar dan mengganggu

keseimbangan biologis di dalamnya. Pertambangan *silica-coal* memiliki karakteristik ukuran dapat bervariasi mulai dari skala nanometer hingga mikrometer. Karakteristik air limbah batu bara tergantung pada karakteristik batu bara sumbernya dan pada umumnya berperingkat rendah (*low rank coal*) (Munir and Sodikin, 2009).

Pengelolaan air limbah melalui proses kimia melibatkan penggunaan berbagai reaksi kimia untuk menghilangkan atau mengurangi kontaminan yang terdapat dalam air limbah. Untuk proses kimia yaitu dengan proses koagulasi-flokulasi. Koagulan dan flokulan merupakan zat kimia bermuatan positif yang sering digunakan dalam pengolahan air minum dan air limbah (Hadadi *et al.*, 2022). Koagulasi adalah tahapan penting dalam pengolahan air yang melibatkan transformasi partikel koloid menjadi struktur agregat yang lebih besar yang disebut flok. Proses ini juga mencakup penyerapan bahan organik yang larut ke dalam struktur flok tersebut, yang memungkinkan kontaminan yang tersebar dalam air dapat diangkat dan dipisahkan lebih efektif melalui proses penyaringan padat-cair. Dalam koagulasi, partikel-partikel yang awalnya terdispersi dan sulit dihilangkan dapat diubah menjadi kelompok partikel yang lebih besar, sehingga memudahkan penghapusan kontaminan dan menghasilkan air yang lebih jernih serta bebas dari zat-zat berbahaya. (Haydar dan Aziz, 2009 dalam Wibowo *et al.*, 2020). Koagulan yang sering digunakan adalah Aluminium Sulfat dan Poly Aluminium Chloride (PAC) (Erna Widiyanti, 2018).

Kehadiran ukuran partikel yang bervariasi dalam air limbah tambang *silica-coal* menjadi tantangan dalam proses pengolahan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan yang efektif untuk mengatasi variasi ini, dan proses koagulasi-flokulasi dengan bahan kimia telah terbukti menjadi salah satu pendekatan yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja dua jenis koagulan, yaitu *ferric sulfate* dan *ferric chloride*, dalam upaya mencapai hasil yang lebih optimal dalam pengolahan air limbah. Pemilihan jenis koagulan *ferric sulfate* dan *ferric chloride* didasari oleh kedua jenis koagulan ini mudah untuk didapatkan di pasaran, sehingga mudah untuk diaplikasikan. Melalui penelitian ini juga, diharapkan dapat diidentifikasi koagulan yang paling efektif dalam mengatasi variasi ukuran partikel yang kompleks, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dalam proses koagulasi-flokulasi. Hasil penelitian ini akan menjadi landasan untuk pengembangan metode pengolahan air limbah tambang *silica-coal* yang lebih baik, lebih efisien, dan ramah lingkungan di masa mendatang

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Persiapan Air Limbah

Air limbah yang dipakai dalam eksperimen ini merupakan air limbah alami yang diperoleh dari kolam pertama pengolahan limbah tambang *silica-coal* yang sudah ada. Pengambilan air limbah ini dilakukan pada bulan Agustus 2023, di mana pada waktu tersebut terjadi musim kemarau yang telah berlangsung sekitar 4 bulan sehingga parameter air limbah tidak seburuk saat musim hujan.

2.2 Proses Operasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menemukan jenis zat kimia serta perlakuan yang sesuai untuk mengurangi kandungan TSS dalam limbah cair Tambang *silica-coal*. Pendekatan penelitian dimulai dengan karakterisasi air limbah melalui pengujian TSS, pH, konduktivitas listrik, dan kandungan logam di dalamnya. Selain itu, partikel padatan dalam air limbah juga di karakterisasi dengan mengukur ukuran partikel dan potensial zeta.

Proses dengan metode koagulasi dan flokulasi telah banyak digunakan dalam pengolahan air limbah maupun air minum (Ma'cczak *et al.*, 2022). Di dalam air, mayoritas partikel tersuspensi cenderung kecil dan bermuatan negatif. Sebagai hasilnya, partikel-partikel tersebut perlu digabungkan untuk membentuk flok yang lebih besar guna mempercepat proses sedimentasi. Tantangan terjadi karena gaya tolak-menolak yang menghambat partikel bermuatan negatif berkumpul, sehingga memperlambat proses ini. Untuk mengatasi masalah tersebut, partikel perlu didestabilisasi dengan bantuan koagulan (Diver, Nhapi and Ruziwa, 2023).

Eksperimen metode koagulasi-flokulasi dilaksanakan melalui uji *jar test* menggunakan flokulator. Proses koagulasi-flokulasi ini melibatkan dua jenis koagulan, yakni *ferric Sulfate* ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) dan *ferric klorida* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Setiap jenis koagulan diberikan dosis berbeda untuk mencapai dosis optimum. Setelah ditemukan dosis optimum, dilakukan variasi pH pada masing-masing jenis koagulan dengan dosis yang optimal. Penyesuaian pH dilakukan dengan penambahan larutan asam (H_2SO_4) atau larutan basa (NaOH).

2.3 Prosedur Penelitian

Pengujian TSS dilakukan dengan menggunakan alat spektrofotometer (Hach:DR900). Sementara untuk analisis pH dan konduktivitas listrik, digunakan perangkat khusus, yakni pH meter (HACH SENSION 2) dan *conductivity* meter (Lutron WAC-2019SD). Penentuan kandungan logam Fe dan Mn dilakukan sesuai metode yang telah diatur dalam

standar SNI 6989-84:2019, sedangkan untuk logam Si, proses pengukuran mengacu pada metode standar SNI 6989-34:2012. Pengujian ini dilakukan seminggu setelah air limbah diambil karena melalui proses pengiriman dari lokasi pengambilan air limbah ke tempat pengujian dilakukan.

Dalam melakukan karakterisasi partikel padatan dalam air limbah, langkah pertama adalah melakukan pengukuran ukuran butiran menggunakan metode gravitasi dengan memanfaatkan kertas saring berukuran 20 μ m (0,02 mm). Selain itu, untuk mengetahui zeta potensial, dilakukan pengukuran menggunakan alat khusus Horiba SZ-100. Metode pengukuran ini secara komprehensif dilakukan guna memahami karakteristik partikel padatan yang ada dalam air limbah, sehingga informasi yang diperoleh dapat mendukung pemahaman yang lebih luas terkait sifat dan komposisi partikel solid tersebut.

Pengujian *jar test* merupakan tahap penting dalam mengevaluasi efektivitas koagulan dalam proses pengolahan air limbah. Dalam pengujian ini, koagulan *ferric sulfate* digunakan dengan dosis 150 hingga 250 mg/L, sementara *ferric chloride* diberikan dengan rentang dosis antara 50 hingga 150 mg/L, dengan penambahan interval dosis sebesar 20 mg/L pada setiap tahapnya. Pemilihan dosis yang digunakan didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh Risdianto, (2007) bahwa dosis optimum koagulan *ferric sulfate* berada pada range 70-200 mg/L dan *ferric chloride* yaitu pada range 35-150 mg/L. Hal ini mengacu variasi dosis yang diterapkan pada masing-masing jenis koagulan bertujuan untuk menilai respons terhadap pengendapan partikel dalam air limbah.

3 PEMBAHASAN

Air limbah yang timbul dari aktivitas pertambangan merupakan jenis air yang terjadi di area penambangan dan pembentukannya dipengaruhi oleh keberadaan kandungan lumpur dan material khusus di sekitar wilayah penambangan tersebut. Selain itu, adanya mineral sulfida yang terikat dengan oksigen dalam air juga memiliki potensi untuk menyebabkan munculnya logam-logam berat serta penurunan tingkat keasaman pH (Desiana, Ngatijo and Lagowa, 2022). Oleh karena itu, pengolahan air limbah yang dihasilkan dari aktivitas penambangan *silica-coal* harus memperhatikan berbagai parameter kualitas air yang telah ditetapkan oleh pemerintah, dan harus memastikan agar nilai-nilai parameter tersebut tidak melebihi standar baku mutu yang telah ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Hal ini penting sebagai bagian dari upaya menjaga kelestarian lingkungan serta mematuhi regulasi yang berlaku dalam pengelolaan limbah industri.

3.1 Karakteristik Butiran dan Air Limbah

Dari hasil karakterisasi awal air limbah tambang *silica-coal* pada tabel 1, dari beberapa parameter yang di uji menunjukkan angka yang masih aman atau berada di bawah standar baku mutu air limbah yang telah ditetapkan, akan tetapi pada parameter TSS menunjukkan hasil yang tinggi dan tidak memenuhi standar baku mutu.

Tabel 1. Karakteristik Air Limbah Pertambangan *Silica-Coal*

Parameter	Satuan	Baku Mutu (KLHK, 2022)	Hasil Uji
TSS	mg/L	200	848
pH	-	6-9	7,76
<i>Electrical Conductivity</i>	uS/cm	-	67,22
Zeta Potensial (ζ)	mV	-	-23,7
Besi (Fe)	mg/L	7	5,972
Mangan (Mn)	mg/L	4	0,148
Aluminium (Al)	mg/L	-	7,969
Silica (Si)	mg/L	-	3,666

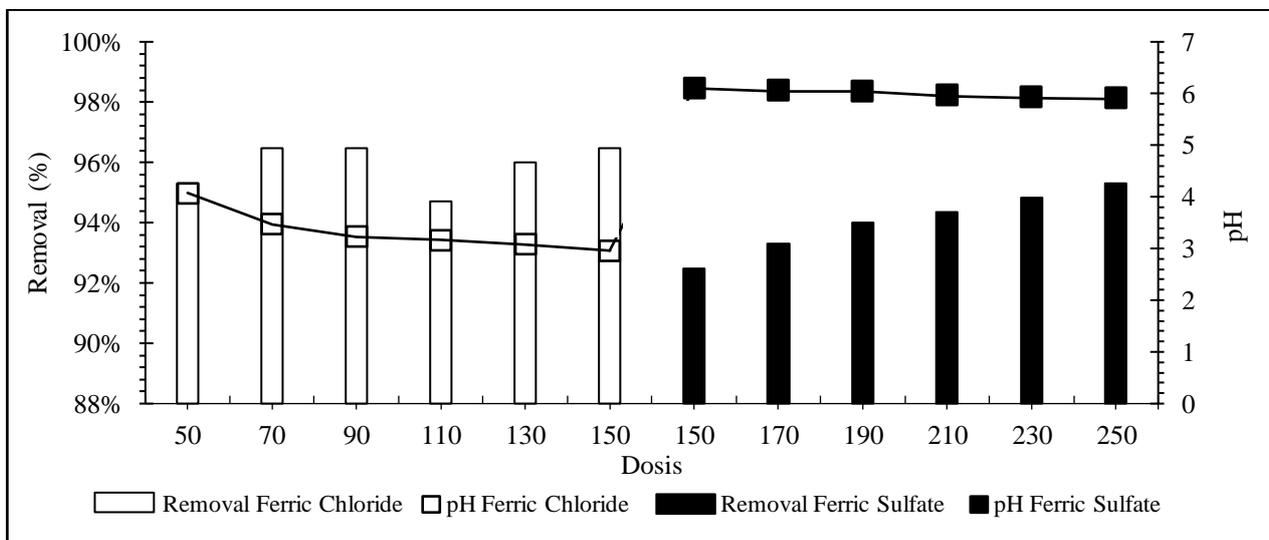
Zeta potensial (ζ) adalah reaksi mikroskopik dari sifat permukaan partikel air limbah *silica-coal* yang dihasilkan oleh lapisan listrik yang terbentuk antara permukaan partikel dan medium di sekitarnya. Permukaan partikel air limbah tambang *silica-coal*, tersuspensi dengan muatan negatif yang kuat, zeta potensial (ζ) sekitar -23,7 mV, dan menyebabkan tolakan elektrostatis yang kuat antara partikel air limbah tambang *silica-coal*, yang membentuk sistem koloid yang stabil sehingga sulit untuk diendapkan (Chang *et al.*, 2022).

Biasanya, nilai zeta potensial partikel dalam air limbah berkisar antara -11 mV hingga 22 mV. Pada kondisi optimal, koagulasi terbaik terjadi ketika nilai zeta potensial mencapai nol. Penurunan nilai zeta potensial dapat dicapai dengan menambahkan ion yang memiliki muatan berlawanan. Penambahan ini akan mengurangi perbedaan muatan antara partikel, mengurangi ketebalan lapisan ganda, dan akhirnya dapat mengurangi nilai zeta potensial (Susanto, 2008).

Dalam penelitian ini, klasifikasi ukuran partikel dalam air limbah dilakukan menggunakan filtrasi kertas saring dengan porositas 20µm (0,02 mm) pada empat sampel terpisah. Hasilnya menunjukkan dominasi partikel berukuran kurang dari 20µm dalam klasifikasi, dengan proporsi 14,26% untuk partikel lebih besar dari 20µm dan 85,74% untuk partikel lebih kecil dari 20µm. Ukuran partikel yang relatif kecil ini mengindikasikan rendahnya kecepatan sedimentasi, yang menggarisbawahi perlunya penambahan koagulan untuk meningkatkan ukuran partikel dan mempercepat proses sedimentasi.

3.2 Hasil Jar Test

Dari gambar 1 proses koagulasi-flokulasi menggunakan jenis koagulan *ferric sulfate* dosis rendah kurang baik dalam proses koagulasi-flokulasi air limbah tambang *silica-coal*. Namun pada dosis tinggi dapat dilihat bahwa dosis *ferric sulfate* yang optimum dalam proses koagulasi flokulasi yaitu 250 mg/L dengan efisien *removal* sebesar 95,30%. Dengan menggunakan dosis yang tinggi seperti itu dapat menyebabkan penurunan pH air limbah dan peningkatan *electrical conductivity*. Hal ini disebabkan oleh sifat asam yang disebabkan oleh pelepasan anion dengan meningkatnya dosis koagulan yaitu sulfat dan klorida selama koagulasi-flokulasi (Dhrubo, Jannat and Hossain, 2023).



Gambar 1 Hasil Koagulasi-Flokulasi *Ferric sulfate* (Fe₂(SO₄)₃) dan *Ferric chloride* (FeCl₃.6H₂O)

Pada gambar 1 juga proses koagulasi-flokulasi menggunakan jenis koagulan *ferric chloride*, dapat dilihat bahwa *ferric chloride* sangat baik dalam *removal* TSS dan didapatkan hasil bahwa dosis *ferric chloride* yang tepat untuk penurunan kadar TSS yaitu 70 mg/L, 90 mg/L dan 150 mg/L dengan efisiensi *removal* 96,47%. Akan tetapi koagulasi-flokulasi menggunakan *ferric chloride* memiliki kekurangan yaitu menurunkan kadar pH yang sangat drastis. Namun dapat dikatakan bahwa dosis 70 mg/L adalah dosis yang paling optimum karena dari ketiga dosis dengan *removal* tertinggi, dosis 70 mg/L yang mengalami penurunan pH paling sedikit.

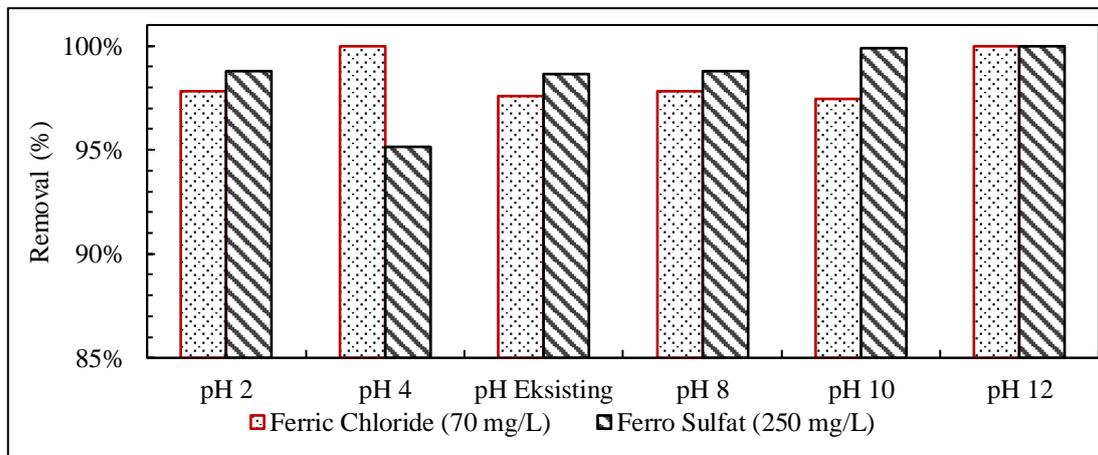
Berdasarkan hasil yang dijelaskan diatas, dari parameter awal zeta potensial -23,7 mV, tersuspensi dengan muatan negatif yang kuat dan menyebabkan tolakan elektrostatis yang kuat antara partikel air limbah tambang *silica-coal*, yang membentuk sistem koloid yang stabil sehingga sulit untuk diendapkan (Chang *et al.*, 2022). Dengan penambahan koagulan dan proses koagulasi-flokulasi menetralkan muatan negatif pada permukaan partikel air limbah tambang *silica-coal* (Wu *et al.*, 2009) oleh sebab itu dibutuhkan interaksi antara koagulan yang bermuatan positif dan partikel air limbah tambang *silica-coal*, menyebabkan perubahan pada muatan partikel air limbah *silica-coal* dengan meningkatkan muatan positif pada partikelnya yang berasal dari koagulan bermuatan positif (Chang *et al.*, 2022).

Penambahan dosis koagulan juga berdampak pada parameter lain dalam air limbah. Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan dosis koagulan cenderung menyebabkan penurunan pH dalam air limbah. Hal ini mungkin disebabkan oleh reaksi kimia yang terjadi antara koagulan dan komponen dalam air limbah, hal serupa terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh (Qasim and Mane, 2013) yang menyatakan penurunan pH setelah penambahan koagulan aluminium sulfat (tawas). Selain itu, penambahan dosis koagulan juga berdampak pada peningkatan *electrical conductivity* dalam air limbah. Peningkatan nilai konduktivitas, hal ini mungkin terjadi karena ion-ion dari padatan terlarut dalam sampel air menciptakan kemampuan air untuk menghantarkan arus listrik (Shan *et al.*, 2017).

3.3 Modifikasi pH Air Limbah

Modifikasi pH pada air limbah tambang *silica-coal* dilakukan untuk mendalami perilaku yang terjadi dalam proses koagulasi-flokulasi pada pH tertentu. Proses ini bertujuan untuk memahami bagaimana kondisi pH yang berbeda memengaruhi proses pengolahan air limbah menggunakan metode koagulasi-flokulasi. Air limbah dimodifikasi pada berbagai tingkat pH, yaitu pH 2 (asam), pH 4, pH eksisting (sebagai pembanding), pH 8, pH 10, dan pH 12 (basa). Modifikasi pH ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhang *et al.* (2023) yang melakukan modifikasi pH untuk melihat pengaruh pH terhadap kinerja koagulan.

Berdasarkan hasil gambar 2 yang menunjukkan efisiensi total *removal* dari berbagai jenis koagulan pada berbagai tingkat pH dalam air limbah, beberapa pola perilaku dapat diamati. Efisiensi total *removal* merupakan persentase padatan tersuspensi yang berhasil dihilangkan dari air limbah selama proses koagulasi-flokulasi. Pada rentang pH 2 hingga pH eksisting (nilai pH yang ada secara alami), *Ferric Sulfat* dan *Ferric Chloride* menunjukkan efisiensi *removal* yang tinggi, seringkali mencapai di atas 95% hingga mencapai *removal* 100%. Hal ini menunjukkan kemampuan yang baik dari keempat jenis koagulan dalam menghilangkan padatan tersuspensi dalam air limbah pada kebanyakan rentang pH yang diuji.



Gambar 2 Hasil Koagulasi-Flokulasi dengan Modifikasi pH Air Limbah

Peningkatan *removal* pada pH 2 dan pH 12 terjadi karena perubahan nilai pH memengaruhi kejenuhan larutan terhadap mineral-mineral yang terdapat dalam air limbah. Pada pH 2, nilai pH yang sangat rendah mengakibatkan ion-ion logam seperti aluminium, besi, atau logam lainnya menjadi lebih larut dan terionisasi dalam larutan. Seiring peningkatan pH ke nilai ekstrem, seperti pada pH 12, ion-ion tersebut menjadi kurang larut dan cenderung mengalami pengendapan. pH memegang peranan penting dalam pembentukan endapan ketika ion-ion logam berikatan dengan ion hidroksida OH⁻ yang hadir dalam presipitasi (misalnya NaOH), sehingga menghasilkan endapan (Asri *et al.*, 2010) sehingga pada pH 12 mencapai *removal* 100%.

4 KESIMPULAN

Dari hasil *jar test* yang dilakukan menggunakan *ferric sulfate* dan *ferric chloride*, dapat disimpulkan bahwa penggunaan kedua jenis koagulan menghasilkan *removal* TSS dengan baik. Pada koagulan *ferric sulfate* dengan dosis 250 mg/L mendapatkan *removal* TSS sebesar 95,30% dan untuk *ferric chloride* sebesar 96,47%. Akan tetapi penggunaan *ferric chloride* akan lebih disarankan karena menggunakan dosis yang lebih sedikit yaitu 70 mg/L, walaupun harus tetap dilakukan penetralan kembali air limbah ke rentang pH sesuai standar baku mutu yang ditetapkan sebelum air hasil pengolahan dibuang ke air permukaan, dikarenakan penggunaan *ferric chloride* menyebabkan penurunan pH yang drastis pada air limbah. Hasil *jar test* dengan melakukan modifikasi pH menunjukkan bahwa terjadi *removal* TSS yang sangat baik pada pH 2 dan pH 12 yang mencapai 100% dikarenakan kandungan logam pada air limbah juga ikut mengendap. Untuk penelitian selanjutnya dalam tahapan koagulasi-flokulasi, sebaiknya melakukan percobaan untuk membandingkan variasi waktu adukan dan kecepatan adukan. Langkah ini penting untuk mengoptimalkan efisiensi pengolahan air limbah melalui proses koagulasi-flokulasi.

REFERENSI

Chang, M. *et al.* (2022) 'The Synergistic Effects of Al³⁺ and Chitosan on the Solid-Liquid Separation of Coal Wastewater and Their Mechanism of Action', *Polymers*, 14(19), p. 3970. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14193970>.

- Desiana, N., Ngatijo and Lagowa, M.I. (2022) 'Pengelolaan Air Limbah Tambang dengan Metode Bioadsorpsi Menggunakan Karbon Aktif Tempurung Kelapa', *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 18(2), pp. 97–103. Available at: <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No2.2022.1175>.
- Dhrubo, A.A.K., Jannat, M. and Hossain, M.S. (2023) 'Enhancing the performance of coagulants for wastewater treatment by varying and optimizing the experimental parameters', *Journal of Water Process Engineering*, 55(August), p. 104144. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104144>.
- Diver, D., Nhapi, I. and Ruziwa, W.R. (2023) 'The potential and constraints of replacing conventional chemical coagulants with natural plant extracts in water and wastewater treatment', *Environmental Advances*, 13(May), p. 100421. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100421>.
- Erna Widiyanti, S. (2018) 'Optimization of the Aluminum Sulfate and Pac (Poly Aluminum Chloride) Coagulant on Tello River Water Treatment', *Konversi*, 7(1), pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.31213/konv.7.1.1>.
- Fitriyanti, R. (2014) 'Karakteristik Limbah Cair Stockpile Batubara', *Jurnal Media Teknik*, 11(1), pp. 12-17. Palembang.
- Hadadi, A. *et al.* (2022) 'Comparison of Four Plant-Based Bio-Coagulants Performances against Alum and Ferric Chloride in the Turbidity Improvement of Bentonite Synthetic Water', *Water (Switzerland)*, 14(20). Available at: <https://doi.org/10.3390/w14203324>.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2022) 'Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2022 Tentang Pengolahan Air Limbah Bagi Usaha Dan/Atau Kegiatan Pertambangan Dengan Menggunakan Metode Lahan Basah Buatan', pp. 1–23. Available at: https://jdih.menlhk.go.id/new/uploads/files/2022pmlhk005_menlhk_04112022102337.pdf.
- Ma'cczak, P. *et al.* (2022) 'The Use of Chitosan and Starch-Based Flocculants for Filter Backwash Water Treatment'. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15031056>.
- Munir, S. and Sodikin, I. (2009) 'Hubungan Antara Parameter Karakteristik Limbah Batubara Kalimantan Timur Dan', 05, pp. 40–46.
- Sarief, H. S. (1989) *Fisika - Kimia Tanah Pertanian*. Cet. Pertama. Bandung: Pustaka Buana, Bandung, 1989.
- Susanto, R. (2008) *Optimasi Koagulasi-Flokulasi Dan Analisis Kualitas Air Pada Industri Semen*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Wibowo, W. *et al.* (2020) 'Instalasi Waste Water Treatment Plant (Wwtp) Untuk Menurunkan Total Suspended Solid Sesuai Baku Mutu Pada Air Sump Yang Berkadar Silika Tinggi', *Prosiding Tpt Xxix Perhapi 2020*, pp. 271–280.
- Wirasembada, Y.C., Setiawan, B.I. and Saptomo, S.K. (2017) 'Penerapan Zero Runoff System (ZROS) dan Efektivitas Penurunan Limpasan Permukaan Pada Lahan Miring di DAS Cidanau, Banten', *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 23(2), p. 102. Available at: <https://doi.org/10.14710/mkts.v23i2.15983>.