

Optimalisasi Proses Koagulasi - Flokulasi untuk Meningkatkan Kualitas Air Limbah Limpasan Batubara

Dianty Rosirda Dewi Kurnia*, Endang Kusumawati, Rahmad Fadjri Witular, Fajri Shafi Nabiha

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung Jawa Barat, Bandung

*Koresponden email: dianty.rosirda@polban.ac.id

Diterima: 29 Juli 2025

Disetujui: 15 Agustus 2025

Abstract

Open coal storage produces liquid waste in the form of coal runoff wastewater. Coal runoff wastewater is black in color so it cannot be discharged into the environment. This study aims to optimize the coagulation, flocculation, and sedimentation processes by determining the type, dosage, and optimum pH of coagulants and the optimum dosage of flocculants to reduce TSS, neutralize pH, and conduct economic analysis to improve effluent quality. The types of coagulants used are poly aluminum chloride (PAC), aluminum sulfate (alum), and ferric chloride, as well as aquaclear flocculant. In addition to TSS and pH, Fe and Mn analyses were carried out to meet the parameters in the established quality standards. The results showed that the optimum conditions for each coagulant were PAC at a dose of 165 ppm with a pH of 7.04; alum at a dose of 200 ppm with a pH of 7.70; and FeCl₃ at a dose of 225 ppm with a pH of 7.54. The optimum flocculant dose was 0.6 ppm for PAC and alum coagulants and 0.3 ppm for FeCl₃ coagulants. After the addition of optimum coagulants and flocculants, the TSS value of PAC decreased to 100.5 mg/l, alum to 102.5 mg/l, and FeCl₃ to 57.5 mg/l. Alum coagulant, in terms of coagulant dose, flocculant, and sludge volume, was the most economical choice with a total expenditure of Rp20,371.76/day/m³ of waste.

Keywords: coal runoff wastewater, flocculation, coagulation, sedimentation

Abstrak

Penyimpanan batubara terbuka menghasilkan limbah cair berupa air limbah limpasan batubara. Air limbah limpasan batubara berwarna hitam sehingga tidak dapat dibuang ke lingkungan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengoptimalkan proses koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi. Kemudian menentukan jenis, dosis, dan pH optimum koagulan serta dosis optimum flokulan terhadap penurunan TSS, menetralkan pH, dan melakukan analisis ekonomi untuk meningkatkan kualitas efluen. Jenis koagulan yang digunakan adalah *poly aluminium chloride* (PAC), *aluminium sulfate* (tawas), dan *ferric chloride*, serta flokulan aquaclear. Selain TSS dan pH, dilakukan analisis Fe dan Mn untuk memenuhi parameter pada baku mutu yang ditetapkan. Hasil penelitian menunjukkan kondisi optimum untuk setiap koagulan adalah PAC pada dosis 165 ppm dengan pH 7,04; tawas pada dosis 200 ppm dengan pH 7,70; dan FeCl₃ pada dosis 225 ppm dengan pH 7,54. Dosis optimum flokulan adalah 0,6 ppm untuk koagulan PAC dan tawas dan 0,3 ppm untuk koagulan FeCl₃. Setelah penambahan koagulan dan flokulan optimum, nilai TSS PAC turun menjadi 100,5 mg/l, tawas menjadi 102,5 mg/l, dan FeCl₃ menjadi 57,5 mg/l. Koagulan tawas ditinjau dari dosis koagulan, flokulan, dan volume lumpur merupakan pilihan yang paling ekonomis dengan total pengeluaran sebesar Rp20.371,76/hari/m³ limbah.

Kata Kunci: air limbah limpasan batubara, flokulasi, koagulasi, sedimentasi

1. Pendahuluan

Batubara merupakan bahan bakar utama yang digunakan dalam proses pembakaran. Batubara dibutuhkan dalam jumlah yang cukup besar sehingga memerlukan tempat penyimpanan (*stockpile*) yang luas. Penyimpanan batubara yang dilakukan di tempat terbuka akan menghasilkan air limbah berupa limpasan (*run-off*) yang berwarna hitam pekat.

Air limbah tersebut mengandung padatan tersuspensi dan sejumlah zat terlarut. Padatan tersuspensi yang berasal dari *run-off stockpile* batubara berada pada kadar di atas 500 mg/l bahkan mencapai 10.000 mg/l. Warna pada air dapat disebabkan oleh kandungan bahan organik dan bahan anorganik karena keberadaan plankton, humus, dan ion-ion logam (misalnya besi (Fe) dan mangan (Mn), serta bahan-bahan lain. Adanya oksida besi menyebabkan air berwarna kemerahan, sedangkan keberadaan oksida mangan menyebabkan air berwarna kecoklatan atau kehitaman [1].

Air limbah limpasan batubara yang berwarna hitam pekat, tidak dapat dibuang ke lingkungan. Karakteristik air limbah limpasan batubara adalah TSS sebesar 612 mg/l ; pH sebesar 8,02 ; kadar Fe sebesar 3,07 dan kadar Mn sebesar 0,418. Kadar Fe dan Mn sudah berada dibawah baku mutu. Salah

satu metode yang digunakan untuk mengatasi *Total Suspended Solid* (TSS), pH dan kandungan warna yang tinggi adalah koagulasi-flokulasi. Melalui pemilihan jenis dan dosis koagulan serta flokulan optimum.

Jenis koagulan yang umum digunakan adalah *poly aluminium chloride* (PAC), *aluminum Sulfate* (tawas), dan *ferric chloride* (FeCl₃). Penelitian sebelumnya telah dilakukan oleh [2] yang mengolah air limbah batubara menggunakan PAC, Tawas, dan FeCl₃ sebagai koagulan dengan rentang 10 ppm hingga 220 ppm yang dapat menyerap logam Fe dan Mn secara berturut-turut mencapai 96% dan 30% selain itu juga mengurangi TSS hingga 98% dan meningkatkan pH menjadi netral.

Karakteristik air limbah limpasan batubara dalam baku mutu meliputi Kadar besi (Fe), Kadar mangan (Mn), pH, dan TSS. Warna bukan merupakan karakteristik baku mutu air limpasan batubara. Tetapi, merupakan faktor fisika yang tampak bila dibuang ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan. Baku mutu air limbah limpasan batubara mengacu pada keputusan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup (Permen LH) Nomor 113 Tahun 2003 tentang baku mutu limbah air pengolahan batubara dengan kadar besi (Fe) sebesar 7 mg/l, kadar mangan (Mn) sebesar 4 mg/l, TSS sebesar 200 mg/l, dan nilai pH sebesar 6-9. Dalam proses koagulasi dan flokulasi terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil olahan limbah. Faktor tersebut adalah komposisi limbah, jenis koagulan dan flokulan, dosis koagulan dan flokulan, pH limbah, suhu serta kecepatan pengadukan [3]. Sehingga memvariasikan jenis, dosis, dan pH koagulan serta dosis flokulan diharapkan dapat menghasilkan kondisi proses yang optimum sehingga dapat menghasilkan kandungan TSS dan pH pada air limbah limpasan batubara yang sesuai dengan baku mutu.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *jar test* untuk mencari dosis optimum koagulan, dosis optimum flokulan aquaclear, dan pH optimum. Penelitian dilakukan di laboratorium Pengolahan Limbah Industri Teknik Kimia Politeknik Negeri Bandung. Pada penelitian ini alat yang digunakan yaitu *jar test*, gelas kimia, tabung inhoff, pH meter, oven dan desikator. Bahan yang digunakan yaitu air limbah limpasan batubara, PAC, tawas, FeCl₃, dan aquaclear. Uji karakteristik air limbah limpasan batubara meliputi uji pH dengan pH meter, TSS dengan gravimetri, dan kadar Fe serta Mn dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer*.

Konsentrasi koagulan untuk menentukan dosis optimum adalah 150 ppm, 175 ppm, 200 ppm, dan 225 ppm. Koagulan dimasukkan kedalam gelas kimia yang sudah di isi air limbah. Proses koagulasi dilakukan selama 1 menit dengan kecepatan pengadukan 100 rpm, setelah itu dimasukkan ke dalam tabung *inhoff* selama 60 menit.

Penentuan pH optimum dilakukan dengan menggunakan dosis optimum dari setiap koagulan yang kemudian dicampur dengan air limbah limpasan batubara yang sudah divariasikan pH-nya menjadi pH 4, 5, 6, 7, dan 8. Konsentrasi flokulan untuk menentukan dosis optimum adalah 0,1 ppm; 0,3 ppm; 0,6 ppm; dan 0,9 ppm yang dimasukkan ke dalam gelas kimia pada proses *jar test* setelah proses koagulasi, dimana berisi koagulan dosis optimum dan pH optimum dengan total 250 ml kemudian di *jar-test* untuk proses flokulasi. Proses flokulasi dilakukan selama 10 menit dengan kecepatan pengadukan di 60 rpm setelah itu dimasukkan ke dalam tabung *inhoff* selama 60 menit. Waktu pengadukan dan kecepatan putaran dalam proses koagulasi dan flokulasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan parameter TSS. Setelah proses koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi di tabung *inhoff* selesai, dilakukan pengujian pH dengan pH meter, kekeruhan dengan turbidimeter dan TSS dengan gravimetri [4].

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis karakteristik air limbah limpasan batubara dapat dilihat pada **Tabel 1** sebagai berikut.

Tabel 1. Karakteristik Air Limbah Limpasan Batubara

Parameter	Nilai	Baku mutu	Peraturan
TSS	612 mg/L	200 mg/L	Permen LH Nomor 113 Tahun 2003
pH	8,02	6 - 9	
Kadar Fe	3,07	7 mg/L	
Kadar Mn	0,418	4 mg/L	

Pada **Tabel 1** tampak bahwa nilai TSS dan pH berada di atas baku mutu, sedangkan kadar Fe dan Mn sudah memenuhi. Hal itu menunjukkan bahwa warna hitam pekat bukan berasal dari logam Fe dan

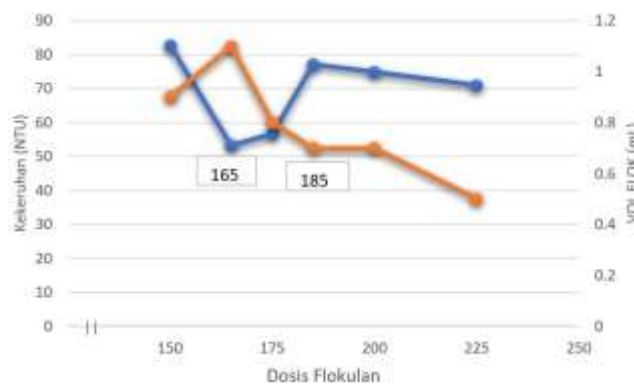
Mn, melainkan dari kandungan partikel halus yang ada pada air limbah limpasan batubara. Warna air limbah limpasan batubara dapat dilihat pada **Gambar 1**.



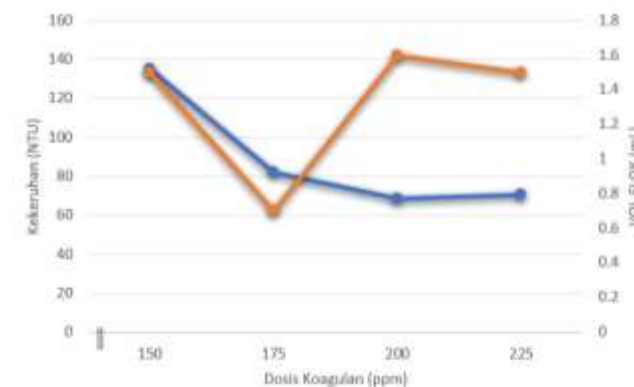
Gambar 1. Warna air limbah limpasan batubara sebelum pengolahan

Penentuan Dosis Koagulan Optimum pada Air Limbah Limpasan Batubara

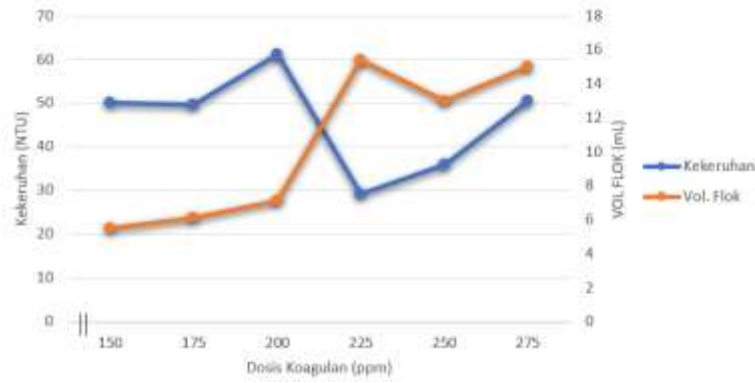
Penentuan dosis optimum dilakukan melalui metode jar-test untuk mengetahui pengaruh dosis koagulan terhadap kekeruhan dan endapan yang terbentuk. Koagulan yang digunakan adalah PAC, tawas, dan $FeCl_3$ untuk mengikat padatan tersuspensi (koloid) yang ada pada air limbah limpasan batubara [5]. Dosis optimum ditentukan dengan melihat sisa kekeruhan terendah dan volume flok tertinggi yang dihasilkan. Pengaruh dosis koagulan PAC, tawas, dan $FeCl_3$ terhadap kekeruhan dan volume flok dapat dilihat pada **Gambar 2** sebagai berikut.



(a) PAC



(b) Tawas



(c) FeCl₃

Gambar 2. Variasi dosis koagulan PAC, tawas, dan FeCl₃ terhadap kekeruhan dan volume flok

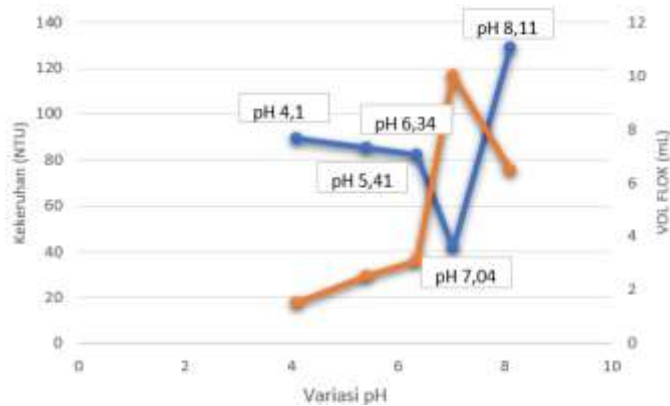
Gambar 2a, menunjukkan bahwa dosis optimum PAC terjadi pada dosis 165 ppm, yaitu dosis yang memberikan nilai kekeruhan terendah dan volume endapan terbesar. Pada dosis 175 hingga 225 ppm nilai kekeruhan meningkat dan volume flok menurun. Hal itu disebabkan dosis koagulan yang ditambahkan berlebih. Berdasarkan mekanismenya, jika ion berlawanan yang teradsorpsi berlebih, muatan partikel koloid akan menjadi positif dan partikel-partikel ini akan saling menjauh sehingga gaya *van der waals* tidak dapat bekerja [6].

Gambar 2b, menunjukkan bahwa koagulan optimum tawas terjadi pada dosis 200 ppm. Pada dosis 150 dan 175 ppm, penambahan garam logam belum cukup untuk mendapatkan kekeruhan optimum, sehingga flok yang terbentuk karena gaya *van der waals* antar partikel belum cukup banyak. Pada dosis 225 ppm, nilai kekeruhan kembali naik karena terjadinya restabilisasi suspensi akibat kelebihan kation pada larutan.

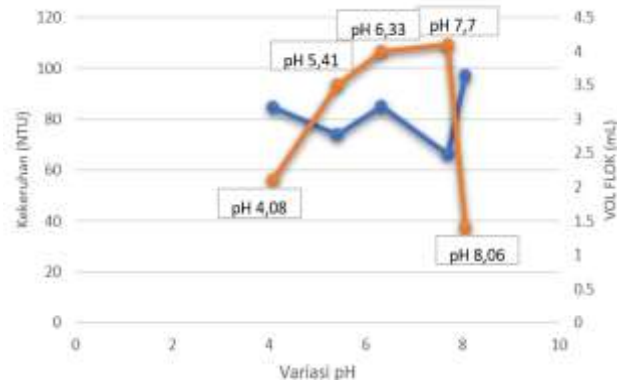
Gambar 2c, menunjukkan bahwa dosis optimum dari koagulan FeCl₃ adalah 225 ppm. Secara visual, terlihat pembentukan flok yang lebih besar dibandingkan dengan variasi dosis lainnya dan setelah mengalami pengendapan akan terlihat lebih jernih. Pada percobaan, hasil koagulasi dengan dosis koagulan di bawah 225 ppm terbentuk flok dengan ukuran kecil. Hal ini dapat menyebabkan rendahnya pemerangkapan partikel koloid sehingga menurunkan efisiensi mekanisme pembentukan endapan. Pada variasi dosis di atas 225 ppm, partikel flok yang terbentuk berukuran cukup kecil. Karena dosis koagulan yang ditambahkan pada air limbah berlebih.

Penentuan pH Optimum pada Air Limbah Limpasan Batubara

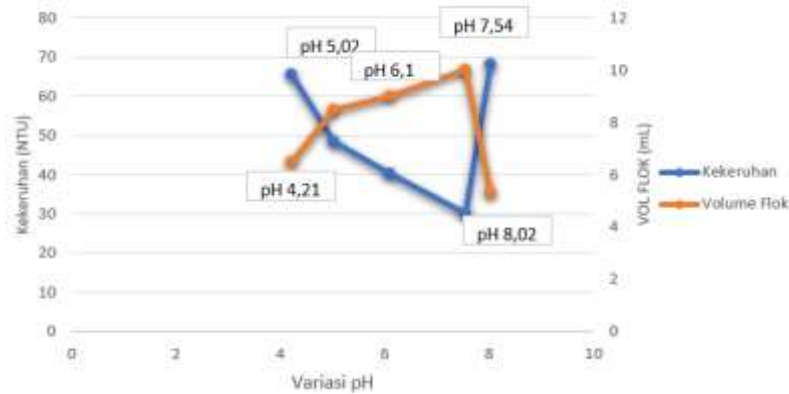
pH memiliki peran penting untuk mengurangi kontaminan seperti logam berat, partikel terlarut, dan senyawa organik. Nilai pH yang sangat rendah atau tinggi dapat menyebabkan pengendapan atau reaksi kimia yang kurang efektif. Pengaruh pH limbah dengan koagulan PAC, tawas, dan FeCl₃ terhadap kekeruhan dan volume flok dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut.



(a) PAC



(b) Tawas



(c) FeCl₃

Gambar 3. Variasi pH limbah dengan koagulan PAC, tawas, dan FeCl₃ terhadap kekeruhan dan volume flok

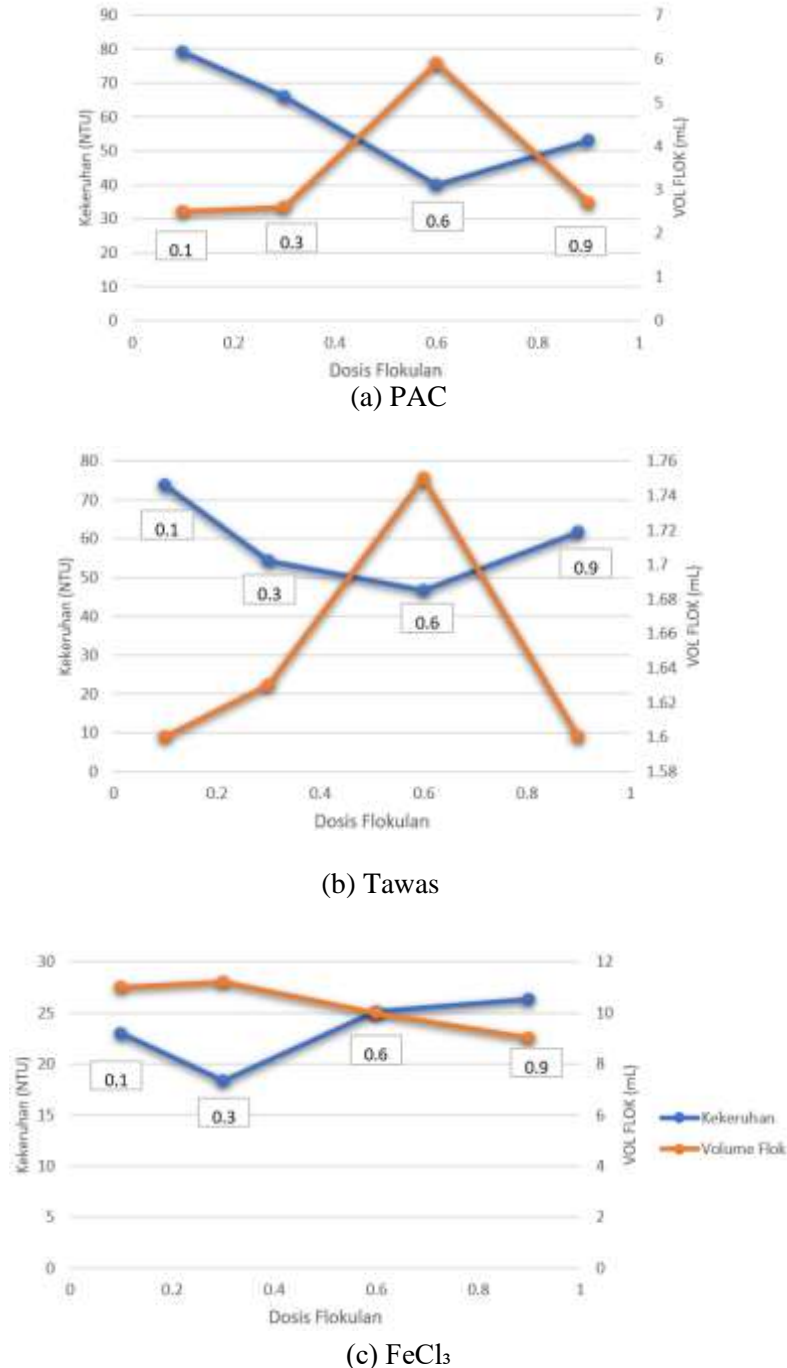
Gambar 3a menunjukkan bahwa perubahan pH pada koagulan PAC berpengaruh terhadap efektivitas proses koagulasi. Pada pH 4,10-6,34, tingkat kekeruhan masih tinggi, sedangkan jumlah flok yang terbentuk sedikit. Hal itu menunjukkan bahwa dalam keadaan asam, kemampuan PAC untuk mengurangi kekeruhan tidak maksimal akibat pengaruh ion aluminium seperti Al³⁺ dan Al(OH)²⁺. tersebut kurang efisien dalam menghubungkan partikel koloid dan menciptakan flok yang stabil. Ketika pH ditingkatkan menjadi 7,04, terlihat penurunan kekeruhan yang diikuti dengan volume flok yang semakin banyak. Namun, ketika pH ditingkatkan menjadi 8,11, kekeruhan kembali meningkat akibat pembentukan Al(OH)₃ yang bersifat gelatin dan dapat menghambat proses pembentukan flok, serta kemungkinan terjadinya restabilisasi partikel [7].

Gambar 3b menunjukkan bahwa pada pH 4,08 menggunakan koagulan tawas nilai kekeruhan masih tinggi, dan volume flok yang terbentuk juga belum maksimal. Hal itu mengindikasikan bahwa pada kondisi asam kuat, efektivitas tawas dalam membentuk flok dan menurunkan kekeruhan belum optimal. pada pH asam, muatan di permukaan partikel koloid positif akibat banyaknya ion hidrogen (H⁺) di dalam larutan. Partikel koloid dan ion aluminium yang bermuatan positif (Al³⁺ dan Al(OH)²⁺), menyebabkan gaya tolak-menolak yang menghambat proses koagulasi [8]. Pada pH 5,41 dan 6,33 volume flok meningkat, tetapi kekeruhan masih tinggi. Volume flok yang meningkat menunjukkan jika reaksi koagulasi mulai berlangsung efektif sehingga koloid mulai terikat dan membentuk flok yang lebih besar. Namun, flok yang terbentuk masih berukuran kecil dan ringan sehingga tetap tersuspensi di dalam air akibatnya, nilai kekeruhan tetap tinggi. Pada pH 7,70, terjadi peningkatan volume flok dan penurunan kekeruhan. Partikel koloid lebih mudah membentuk flok yang lebih besar dan berat, sehingga mudah mengendap.

Gambar 3c menunjukkan bahwa pada pH 4,21 menggunakan koagulan FeCl₃, volume flok yang dihasilkan sedikit dan kekeruhan masih tinggi. Dalam kondisi asam, ion Fe³⁺ memiliki kemampuan yang kuat dalam menetralkan muatan, tetapi flok yang terbentuk masih berukuran kecil, ringan, dan kurang stabil, sehingga mudah terdispersi kembali ke dalam air. Peningkatan pH dari 5,02, 6,10, dan 7,54, menyebabkan penurunan kekeruhan secara bertahap diikuti peningkatan volume flok. Penurunan kekeruhan menunjukkan semakin banyak partikel tersuspensi yang mengendap.

Penentuan Dosis Optimum Flokulan pada Air Limbah Limpasan Batubara

Setelah muatan dinetralkan oleh koagulan, partikel-partikel kecil menjadi lebih mudah untuk berkumpul atau menggumpal. Flokulan berfungsi sebagai penghubung atau jembatan di antara partikel-partikel sehingga terbentuk flok yang cukup besar dan berat untuk dapat mengendap. Pada penelitian ini, flokulan yang digunakan adalah PAA (Poliakrilamida) yang merupakan jenis flokulan polimer. Variasi dosis flokulan dengan koagulan PAC, tawas, dan $FeCl_3$ terhadap kekeruhan dan volume flok dapat dilihat pada **Gambar 4** berikut.



Gambar 4. Variasi dosis flokulan dengan koagulan PAC, tawas, dan $FeCl_3$ terhadap Kekeruhan dan Volume flok

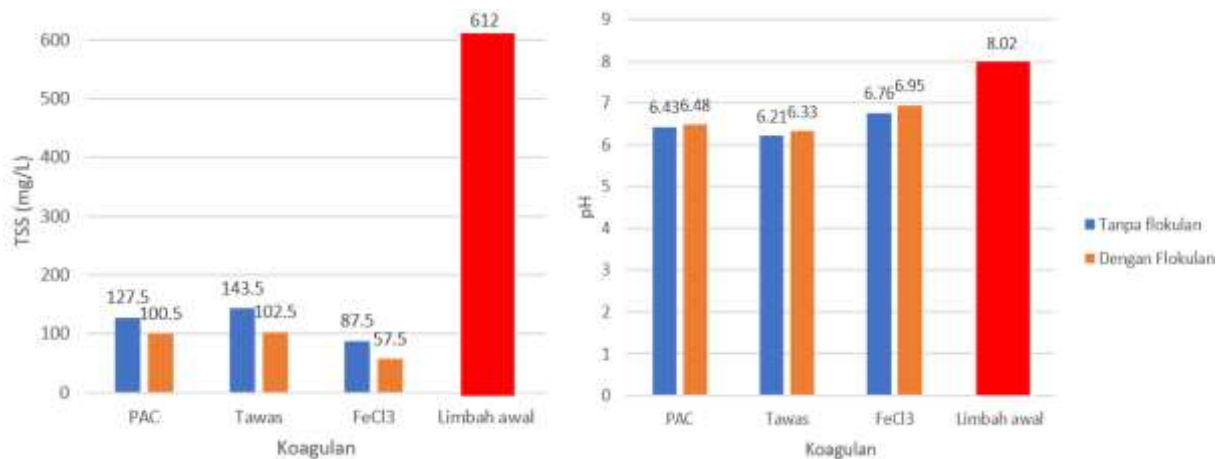
Gambar 4a menunjukkan terdapat penurunan kekeruhan pada dosis flokulan 0,1 ppm hingga 0,3 ppm dengan koagulan PAC. Hal ini menunjukkan bahwa partikel koloid yang bermuatan negatif mulai dinetralkan oleh ion Al^{3+} dari PAC sehingga terbentuk mikroflokk kekeruhan terendah dengan volume flokk tertinggi terjadi pada dosis flokulan 0,6 ppm. Di mana netralisasi muatan partikel terjadi secara maksimal akibat terbentuknya jembatan antara partikel (*bridging flocculation*). Saat dosis flokulan ditingkatkan menjadi 0,9 ppm, terdapat penurunan volume flokk dan peningkatan kembali kekeruhan. Hal itu menyebabkan muatan partikel menjadi sama (restabilisasi) sehingga flokk yang terbentuk menjadi tidak stabil dan dapat terdispersi kembali menjadi partikel kecil yang tersuspensi dalam air limbah [9].

Gambar 4b, menunjukkan terdapat penurunan kekeruhan pada dosis flokulan antara 0,1 ppm hingga 0,3 ppm dengan koagulan tawas. Hal itu terjadi karena ion aluminium (Al^{3+}) dari tawas menetralkan muatan negatif partikel koloid, sehingga partikel saling tarik menarik dan mulai membentuk flokk [10]. Efisiensi maksimal dicapai pada dosis 0,6 ppm, yang menghasilkan nilai kekeruhan terendah. Pada dosis 0,6 ppm, netralisasi muatan serta pembentukan flokk berada dalam keadaan paling optimal, menghasilkan flokk yang besar, padat, dan mudah mengendap. Namun pada dosis 0,9 ppm, tingkat kekeruhan kembali meningkat, sedangkan volume flokk mengalami penurunan. Hal itu menunjukkan terjadi kelebihan flokulan yang mengakibatkan partikel-partikel kembali pada keadaan tidak stabil. Muatan yang sama di antara partikel, menimbulkan gaya tolak-menolak [11]

Gambar 4c menunjukkan terdapat penurunan kekeruhan Pada dosis flokulan 0,1 ppm hingga 0,3 ppm dengan koagulan $FeCl_3$. Volume flokk menunjukkan peningkatan hingga mencapai titik tertingginya pada dosis 0,3 ppm. Pada dosis 0,6 ppm, terjadi peningkatan kekeruhan, meskipun volume flokk mengalami penurunan. Peningkatan kekeruhan disebabkan terjadinya kerusakan pada flokk yang terbentuk. Pada dosis 0,9 ppm, volume flokk berkurang, tetapi tingkat kekeruhan tetap tinggi yang menunjukkan bahwa efisiensi proses koagulasi dan flokulasi menurun. Ini menunjukkan bahwa penggunaan flokulan secara berlebihan dapat menyebabkan partikel menjadi stabil kembali [12].

TSS dan pH Sebelum dan Sesudah Pengolahan

Karakteristik air limbah limpasan batubara setelah dilakukan pengolahan pada konsentrasi koagulan dan flokulan optimum dapat dilihat pada **Gambar 5**.

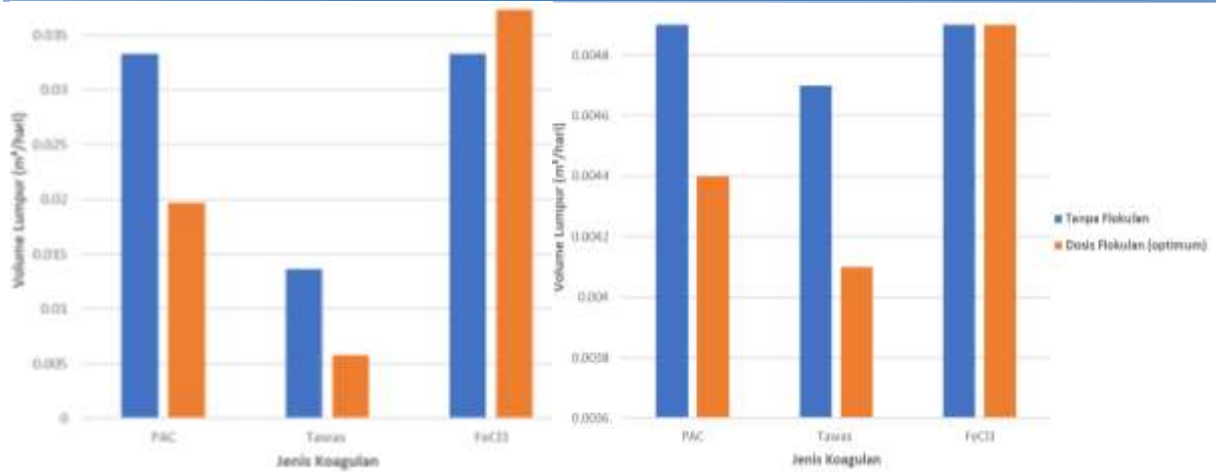


Gambar 5. Nilai TSS dan pH air limbah limpasan batubara setelah pengolahan dan sebelum pengolahan

Dari **Gambar 5**, hasil pengolahan dengan menggunakan dosis dan pH optimum koagulan serta dosis optimum flokulan pada parameter TSS dan pH sudah memenuhi baku mutu sesuai dengan Permen LH Nomor 113 Tahun 2003 tentang baku mutu limbah air pengolahan batubara.

Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi bertujuan untuk mencari jenis koagulan yang ekonomis, tetapi efluen IPAL air limbah limpasan batubara memenuhi baku mutu. Volume lumpur basah yang dihasilkan pada proses koagulasi-flokulasi menggunakan metode jar-test untuk ketiga jenis koagulan dapat dilihat pada **Gambar 6a**, sedangkan volume lumpur kering pada **Gambar 6b**.



(a) Lumpur basah

(b) Lumpur kering

Gambar 6. Volume lumpur basah dan lumpur kering berbagai jenis koagulan

Berdasarkan **Gambar 6**, volume lumpur terendah dihasilkan oleh koagulan tawas. Tawas membentuk flok dengan ukuran lebih kecil dan padat dibandingkan PAC dan FeCl₃. Tawas memiliki kemampuan lebih besar untuk membentuk flok yang lebih besar [13] dan tidak padat karena memiliki lebih banyak gugus aktif [14]. Oleh karena itu volume lumpur kering yang dihasilkan PAC (0,0044 m³/hari) dan FeCl₃ (0,0049 m³/hari) lebih tinggi jika dibandingkan dengan tawas (0,0041 m³/hari). Penambahan flokulan dapat memperkecil pembentukan volume lumpur karena dapat mengikat partikel-partikel kecil menjadi lebih padat [15]. Biaya kebutuhan koagulan dan flokulan ditentukan berdasarkan dosis optimumnya ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Jumlah biaya kebutuhan koagulan dan flokulan per m³ limbah

Keterangan Harga	Koagulan		
	PAC	Tawas	FeCl ₃
Harga Kebutuhan Koagulan (Rp/m ³ limbah)	19.800	16.200	1.650.000
Harga Kebutuhan Flokulan (Rp/m ³ limbah)	71,76	71,76	35,88
Harga Total Kebutuhan Koagulan dan Flokulan (Rp/m ³ limbah)	19.871,76	16.271,76	1.650.035,88

Tabel 2 menunjukkan bahwa koagulan FeCl₃ memerlukan biaya mencapai Rp 1.650.035,88/m³ limbah. Biaya pengolahan limbah keseluruhan ditunjukkan pada **Tabel 3** berikut.

Tabel 3. Jumlah biaya kebutuhan total keseluruhan

Keterangan Harga	Koagulan		
	PAC	Tawas	FeCl ₃
Harga Kebutuhan Koagulan (Rp/hari/m ³ limbah)	19.800	16.200	6.750.000
Harga Kebutuhan Flokulan (Rp/hari/m ³ limbah)	71,76	71,76	35,88
Harga Total Kebutuhan Koagulan dan Flokulan (Rp/hari/m ³ limbah)	19.871,76	16.271,76	1.650.035,88
Harga Pengolahan Lumpur Eksternal (Rp/hari/m ³ limbah)	4.400	4.100	4.900

Harga Total Keseluruhan Biaya (Rp/hari/m ³ limbah)	24.271,76	20.371,76	1.654.935,88
---	-----------	-----------	--------------

Tabel 3 menunjukkan bahwa total biaya tertinggi dengan asumsi laju alir air limbah limpasan batubara sebesar 1 m³ /hari adalah pada penggunaan koagulan FeCl₃, sedangkan koagulan tawas dengan dosis 200 ppm dan penambahan flokulan 0,6 ppm merupakan yang paling ekonomis dengan biaya pengolahan sebesar Rp 20.371,76/hari/m³ limbah.

4. Kesimpulan

Proses pengolahan limbah air limbah limpasan batubara dilakukan dengan metode koagulasi menggunakan koagulan PAC, tawas, dan FeCl₃ serta flokulasi menggunakan flokulan *aquaclear*. Dosis optimum koagulan PAC sebesar 165 ppm, tawas sebesar 200 ppm, dan FeCl₃ sebesar 225 ppm dengan pH optimum 7. Dosis optimum flokulan pada dosis koagulan optimum PAC sebesar 0,6 ppm; tawas sebesar 0,6 ppm; dan FeCl₃ sebesar 0,3 ppm. Jenis koagulan paling ekonomis ditinjau dari dosis, harga, dan volume lumpur serta memenuhi baku mutu limbah adalah tawas dengan biaya sebesar Rp 20.371,76/hari/m³ limbah.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung dan Ciwaruga *Foundation* atas pendanaan penelitian ini untuk Beasiswa Program Pendampingan Tugas Akhir.

6. Referensi

- [1] Fitriyanti, R., "Kajian Instalasi Pengolahan Limbah Cair Stockpile Batubara". 2015, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Sumatera Selatan. Accessed: Januari. 29, 2025.
- [2] Wahyu, S., "Optimasi Penggunaan Koagulan Pada Air Limbah Batubara". 2010, Skripsi, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok. Accessed: Januari. 29, 2025
- [3] Winarni, A., "Optimasi Proses Koagulasi dan Flokulasi Limbah Lindi Hitam dari Hasil Pembuatan Bioetanol, Skripsi, Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta. Accessed: Februari. 3, 2025
- [4] Dienullah, R. M., & Hendrasarie, N. "Pengaruh Bentuk Impeller pada Proses Koagulasi-Flokulasi dalam Mengolah Limbah Industri Batik Organik" *Environmental Science and Engineering Conference (ESEC) Proceedings*, 2(1) 2021. Accessed: Mei. 30, 2025
- [5] Anugrah, A., Ramli, M., Arjunoarwan, A.S., "Optimasi Penggunaan Dosis Koagulan Alum dan Poly Aluminium Chloride (PAC) dalam Pengelolaan Limbah Cair Batubara" *Center Of Technology*, ISSN 2685-4104, tahun 2022. Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Accessed: Mei. 29, 2025
- [6] Risky, Z., Wikaningrum, T., "Optimasi Proses Koagulasi dan Flokulasi pada Pengolahan Primer Air Limbah Kawasan Industri ABC" *Jurnal Serambi*, Vol. VIII, No. 2, April Tahun 2023. Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Presiden. Accessed: Mei. 29, 2025.
- [7] Winarni, Ir., M.Sc., IPM, ASEAN Eng, "Penggunaan Alum dan PAC Pada Proses Koagulasi Air Permukaan". 2024, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Arsitektur Lanskap & Teknologi Lingkungan, Universitas Trisakti, Jakarta. Accessed: Mei.. 29, 2025.
- [8] Ningsih, S., dan Harmawan, T., "Pengaruh Penambahan Al₂(SO₄)₃ Terhadap Derajat Keasaman Air Baku pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Keumueneng Langsa". 2022, *QUIMICA: Jurnal Kimia Sains dan Terapan*, Vol. 4, No. 1, Universitas Samudra, Langsa. Accessed: Juni. 9, 2025.
- [9] Sibiyi, N.P., Rathilal, T., Emmanuel, K.T., "*Coagulation Treatment of Wastewater: Kinetics and Natural Coagulant Evaluation*" *Jurnal Molecules*, Tahun 2021, website: <https://doi.org/10.3390/molecules26030698>. Accessed : Juni.10, 2025
- [10] Aprilianti, W., dan Wahyudin, "Pengaruh Pembubuhan Tawas Sebagai Koagulan Terhadap Penurunan Biological Oxygen Demand Air Limbah Tahu di Dusun Pancor Kopong". 2020, *Jurnal Sanitasi dan Lingkungan*, Vol. 1, No. 2, STTL Mataram, Mataram. Accesed : Juni. 10, 2025.
- [11] Karningsih, D., "Penentuan Dosis Optimum Koagulan Aluminium Sulfat Unit Dissolved Air Flotation Wastewater Treatment PT. X Sidoarjo". 2017, *Jurnal Distilat*, Vol. 3, No. 2, Politeknik Negeri Malang, Malang. Accessed: Juni. 10, 2025.

-
- [12] Alex, R., Parisa, A., Fawell, P.D., John, B.F., "*Polymer flocculation of calcite: Relating the aggregate size to the settling rate*" AICHE Journal, Volume 52, Issue 6 pp 1987-1996, Tahun 2006. Accessed : Juni. 24, 2025
- [13] Murwanto, B., "Efektivitas Jenis Koagulan Poly Aluminium Chloride Menurut Variansi Dosis dan Waktu Pengadukan terhadap Penurunan Parameter Limbah Cair Industri Tahu" Jurnal Kesehatan, may 2018. Accessed : Juni. 25, 2025
- [14] Arifuddin, F.I., Wijaya, R., Prasaningtyas, A., "Kinerja $Al_2(SO_4)_3$ Dan PAC dalam Pengolahan Air Asam Tambang" Jurnal Pertambangan, Vol. 7, Maret 2023. Accessed : Juni. 25, 2025
- [15] Ellis., Astuti, D.A, Winami., "Pengaruh Koagulan Alum, Ferri Klorida serta Flokulan Kuriflock PA-322 terhadap specific resistance lumpur Khrom dan Seng" Skripsi, 2001, Penerbit FALTL Universitas Trisakti. Accessed: Juni. 26, 2025
- [16] Aji, S., Astuti, Y., W, Hidayat., "pengaruh jenis koagulan dan variasi ph terhadap kualitas limbah cair di instalasi pengolahan air" Jurnal Ilmiah, 2021, Jurnal Distilat Politeknik Negeri Malang. Accessed: Juni. 26, 2025.
- [17] T., Daniel C., Fefe., S., Desta D. K., "Efektivitas Koagulan PAC dan Aluminium Sulfat dengan Kombinasi Flokulan pada Limbah Cair Pabrik Sepeda Motor" Jurnal Ilmiah, 2024, Jurnal USWAGATI. Accessed: Juni. 26, 2025.